

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (Pb) ΚΑΙ ΚΑΔΜΙΟΥ (Cd) ΣΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ *Tamarix Smyrnensis*”**

ΦΩΤΕΙΝΗ ΚΟΚΚΑΛΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ

Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΑΝΤΖΑΒΙΝΟΣ

Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΡΑΤΖΑΣ

στον ξύλινο συνοδοιπόρο μου,

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο μεταίχμιο του περάσματος από την ελαφρότητα της στιγμής στην συνειδητότητα της εν αναμονή επιλογής, υπό την σκέπη της θερμής των Χανίων αγκαλιάς -ανθρώπινης και μη- και της έγχορδης αγωνίας για τα μελλούμενα, κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία ξεκίνησε ως υποχρέωση και κατέληξε να διεκδικεί τη θέση του πρώτου δημιουργικού πολυτεχνειακού εκπονήματός μου.

Από το βήμα αυτό λοιπόν θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Καλογεράκη για την καθοδήγησή του, την κ. Ελένη Μανουσάκη για την πολύτιμη συμβολή της στην υλοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης και τους γονείς μου για την ανιδιοτελή πνευματική και υλική προσφορά τους στην εξέλιξη της δημιουργικής μου πορείας.

Τέλος, αν η μελέτη αυτή αποβεί χρήσιμη -παρά τις ασάφειες ή παραλείψεις που ενδέχεται να περιέχει- έστω και σε έναν από τους τυχόν αναγνώστες της, τότε θα έχει εκπληρώσει τον ουσιαστικό λόγο της συγγραφής της.

Χανιά, Οκτώβριος
2007

Φωτεινή Κόκκαλη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

The table of contents is empty because none of the paragraph styles selected in the Document Inspector are used in the document.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, το έδαφος υπόκειται σε μια σειρά διεργασιών και απειλών υποβάθμισης. Οι ακατάλληλες γεωργικές πρακτικές, η έντονη βιομηχανική δραστηριότητα και η αστικοποίηση του πληθυσμού αποτελούν ορισμένους από τους παράγοντες που συνέβαλαν σημαντικά στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων βαρέων μετάλλων στην βιόσφαιρα [1].

Βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο, αν και αποτελούν έντονα τοξικές ουσίες, όταν βρίσκονται σε φυσιολογικές συγκεντρώσεις στο έδαφος δεν επιδρούν αρνητικά στο οικοσύστημα. Ωστόσο, η πρόσφατη διατάραξη των συγκεντρώσεων αυτών έχει δημιουργήσει σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Οι σημαντικές και μακροχρόνιες επιπτώσεις που προκαλούν οι ουσίες αυτές αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη ποικίλων τεχνολογιών εξυγίανσης (Remediation Technologies), στόχος των οποίων είναι είτε η εξολοκλήρου απομάκρυνση είτε η μείωση σε αποδεκτά επίπεδα ρυπογόνων ουσιών.

Ωστόσο, οι περιορισμοί που επιβάλουν συμβατικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών όπως το υψηλό κόστος εφαρμογής, η αισθητική και ηχητική όχληση οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης. Πρόκειται για μια καινοτόμο πολλά υποσχόμενη φιλική προς το περιβάλλον *in-situ* βιολογική μέθοδο αποκατάστασης εδαφών η οποία περιλαμβάνει την απομάκρυνση, τη μεταφορά, τη σταθεροποίηση και την καταστροφή οργανικών και ανόργανων ρύπων με την χρήση φυτών.

Από τους υπάρχοντες μηχανισμούς Φυτοεξυγίανσης, το ενδιαφέρον στην παρούσα μελέτη εστιάστηκε στον μηχανισμό της

Φυτοεξαγωγή, ο οποίος βασίζεται στην διεργασία κατά την οποία κατάλληλα φυτά (τα οποία ανήκουν συνήθως στην κατηγορία των υπερσυσσωρευτών) προσλαμβάνουν τον ρύπο μέσω του ριζικού του συστήματος και τον μεταφέρουν στο υπέργειο τμήμα τους.

Στα πλαίσια του χαρακτηρισμού μεσογειακών φυτών ως ικανών να απομακρύνουν μόλυβδο και κάδμιο από ρυπασμένα εδάφη, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μελετών στο φυτό *Tamarix Smyrnensis*, ένα τμήμα των οποίων αποτελεί και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Σκοπό της εν λόγω εργασίας αποτέλεσε αφενός η μελέτη της ικανότητας του *Tamarix Smyrnensis* να συσσωρεύει το μόλυβδο (Pb) και το κάδμιο (Cd), στον φυτικό του ιστό, η οποία πραγματοποιήθηκε σε υδροπονικές συνθήκες καλλιέργειας και αφετέρου η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών συνθηκών αλατότητας στην συσσώρευση και μεταφορά των συγκεκριμένων μετάλλων στο υπέργειο τμήμα του φυτού, με απώτερο στόχο την χρήση του για απορρύπανση εδαφών ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα μέσω του μηχανισμού της Φυτοεξαγωγής.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ

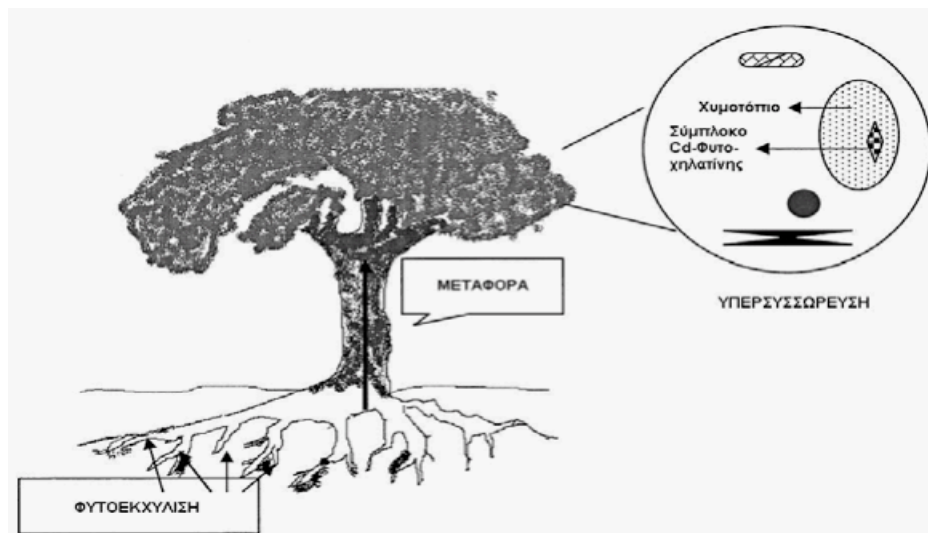
Στα τέλη του 19ου αι., τα φυτά *Thlaspi caerulescens* και *Viola calaminaria* ήταν τα πρώτα είδη φυτών στα οποία διαπιστώθηκε η ικανότητά τους να συσσωρεύουν υψηλές ποσότητες βαρέων μετάλλων στα φύλλα τους. Ωστόσο, η ιδέα της χρήσης φυτών για την απομάκρυνση ρυπαντών φαίνεται ότι υλοποιήθηκε για πρώτη φορά πριν περίπου 300 χρόνια, καθιερώνοντας έτσι το πρώτο σύστημα Φυτοεξυγίανσης στην ιστορία [5].

Το 1935, ο Byers ανέφερε ότι φυτά του είδους *Astragalus* ήταν ικανά να συσσωρεύσουν σελήνιο (Se) σε ποσοστό πάνω από 0.6% του ξηρού βάρους του ιστού τους. Δέκα χρόνια μετά, οι Minguzzi και Vergnano (1948) εντόπισαν φυτά ικανά να συσσωρεύσουν πάνω από 1% νικέλιο (Ni) στο υπέργεο τμήμα τους, ενώ σε πιο πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Rascio (1977), επιβεβαιώθηκε ότι τα φυτά του γένους *Thlaspi caerulescens* είναι πολύ ανθεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων και συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες Zn στο υπέργειο τμήμα τους. Ωστόσο, η ιδέα της χρήσης φυτών για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη εισήχθη εκ νέου και αναπτύχθηκε από τους Utsunamyia (1980) και Chaney (1983) ενώ τη πρώτη εφαρμογή Φυτοεξυγίανσης σε πεδίο ρυπασμένο από Zn και Cd πραγματοποιήθηκε το 1991 [4].

Την ίδια χρονιά καθιερώθηκε ο όρος Φυτοεξυγίανση (Phytoremediation) για να περιγράψει κάθε σύστημα ή διαδικασία

στην οποία χρησιμοποιούνται φυτά, για την *in situ* ή *ex situ* εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών και υδάτων (επιφανειακών ή υπόγειων), μέσω της απομάκρυνσης, διάσπασης και σταθεροποίησης των εκάστοτε ρυπαντών [6].

Η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (E.P.A.), περιλαμβάνει τη φυτοεξυγίανση στην κατηγορία των λεγόμενων καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας (Innovative Treatment Technologies). Πρόκειται για τεχνολογίες οι οποίες εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση επικίνδυνων αποβλήτων και άλλων ρυπογόνων παραγόντων, παρά το ότι δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με το κόστος και την απόδοση που έχουν υπό διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας [7].



Εικόνα 1.1. Τα στάδια που εμπλέκονται κατά την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης από βαρέα μέταλλα [17]

Εργαστηριακές κυρίως μελέτες έδειξαν ότι η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρυπαντών, τόσο οργανικών (π.χ. υδρογονάνθρακες πετρελαίου, χλωριωμένοι διαλύτες, μικροβιοκτόνα, PAHs), όσο και ανόργανων (βαρέα μέταλλα, μεταλλοειδή, ραδιενεργά) μετατρέποντάς τους σε απλούστερες και λιγότερο τοξικές ενώσεις [8], [9].

Αν και στην παρούσα φάση η τεχνολογία αυτή δεν εφαρμόζεται στο πεδίο σε ευρεία κλίμακα, οι ερευνητές θεωρούν ότι πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία εξυγίανσης, με σημαντική δυναμική εξέλιξη και χαμηλό κόστος οργάνωσης και λειτουργίας [10].

Η φυτοεξυγίανση είναι όχι μόνο μια αναπτυσσόμενη επιστήμη αλλά αποτελεί και μια συνεχώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Σύμφωνα με τον Glass, το 1997 δαπανήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες \$1-2 εκατ. για την απορρύπανση πεδίων ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα με τη μέθοδο της φυτοεξυγίανσης με ραγδαία αύξηση το 2000 στα \$15-20 εκατ.[11]. Την ίδια χρονιά η παγκόσμια αγορά φυτοεξυγίανσης εκτιμήθηκε ότι έφτασε τα \$55-103 εκατ., ενώ το 2005 ανήλθε στα \$214-370 εκατ., καθιστώντας την ως μία πλήρως αποδεκτή και συμφέρουσα μέθοδο [12].

Συγκεκριμένα, η φυτοεξυγίανση ρυπασμένων εδαφών με οργανικές ουσίες παρουσιάζει κόστος της τάξεως των 100 - 200 \$ ανά κυβικό μέτρο εδάφους ενώ για τις συμβατικές τεχνολογίες (κυρίως καύση και απόθεση σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής) το αντίστοιχο κόστος κυμαίνεται από \$350-1000 ανά κυβικό μέτρο [13]. Αντίστοιχες διαφορές παρουσιάζονται και στην περίπτωση της εξυγίανσης ρυπασμένων υδροφορέων με οργανικές ουσίες. Συμβατικές τεχνολογίες όπως η Άντληση και Επεξεργασία (Pump and Treat), η Εφαρμογή Φραγμάτων Σιδήρου (Iron Reactive Barrier), παρουσιάζουν κόστος της τάξεως των \$10-15 ανά 1000 γαλόνια επεξεργασμένου νερού, ενώ το αντίστοιχο κόστος της φυτοεξυγίανσης κυμαίνεται από \$1-3 ανά 1000 γαλόνια [14]. Καθοριστική σημασίας είναι η συμβολή της φυτοεξυγίανσης και στην επεξεργασία βαρέων μετάλλων, όπου τα στοιχεία τα οποία υπάρχουν είναι πολύ ενθαρρυντικά [15].

Οι δυνατότητες της μεθόδου έχουν φανεί μέχρι σήμερα σε πολλά πιλοτικά έργα τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα από αυτά στα οποία η μέθοδος εφαρμόστηκε με επιτυχία. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό, τα μέταλλα Cd, Pb, Ni και Zn είναι τα πιο συνήθη μέταλλα για φυτοεξαγωγή. Αν και στα περισσότερα πιλοτικά έργα βασικός στόχος είναι η φυτοεξαγωγή, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στο Βέλγιο και στο Ηνωμένο Βασίλειο προτιμήθηκε ο μηχανισμός της φυτοσταθεροποίησης [24]. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα πιλοτικά αυτά έργα, οι εμπορικές εφαρμογές της μεθόδου συνεχώς αυξάνουν.

Τοποθεσία	Είδος φυτού	Είδος ρυπαντή	Μηχανισμός Φυτοεξυγίανσης
Trenton, NJ	<i>Brassica juncea</i>	Pb	Φυτοεξαγωγή
Anderson, SC	<i>Populus deltoids x P.balsamifera</i>	Διάφορα Βαρέα Μέταλλα	Φυτοσταθεροποίηση
Katowice, Poland	<i>Brassica juncea</i>	Cd, Pb	Φυτοεξαγωγή
Switzerland (Landfield)	<i>Salix viminalis</i>	Cd, Cu, Zn	Φυτοεξαγωγή
United Kingdom	<i>Salix spp.</i>	Ni, Cu, Zn, Cd	Φυτοεξαγωγή, Φυτοσταθεροποίηση
Hlemysdi, Czech Republic	<i>H. annuus, C. Sativa, Z. mays, C. Hallery</i>	Zn	Φυτοσταθεροποίηση
Domach, Switzerland	Improved <i>Nicotiana spp. Plants</i>	Cu, Cd, Zn	Φυτοσταθεροποίηση
Lommel, Belgium	<i>Grasses</i>	Zn, Cd, Pb, Cu	Φυτοσταθεροποίηση
Balen, Belgium	<i>Brassica napus</i>	Zn, Cd, Pb	Φυτοεξαγωγή

Πίνακας 1.1. Παραδείγματα επιτυχημένης εφαρμογής της φυτοεξυγίανσης σε ρυπασμένα από βαρέα μέταλλα πεδία σε Ευρώπη και Αμερική [24].

Οι περισσότερες από τις συμβατικές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η Προσρόφηση σε Ενεργό Άνθρακα, απλά μεταφέρουν τους ρυπαντές σε άλλη περιοχή ή σε διαφορετική φάση. Σημαντική είναι και η δυνατότητα της *in situ* επεξεργασίας, αφού όχι μόνο δεν απαιτείται εκσκαφή του εδάφους, αλλά η εφαρμογή της είναι αισθητικά ευχάριστη, χωρίς να δημιουργεί περιβαλλοντικές οχλήσεις, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή πιθανότητα αποδοχής από το κοινό [18].

Κάθε μέθοδος περιβαλλοντικής εξυγίανσης υπόκειται και σε ορισμένους περιορισμούς και δεν μπορεί να είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα πεδία. Η τοξικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα των προϊόντων βιοαποικοδόμησης δεν είναι πάντα γνωστές και όπως κάθε βιολογική μέθοδος, δεν εξασφαλίζει 100% μείωση ρυπαντών. Επίσης, η κινητικότητα των υποπροϊόντων αποικοδόμησης στο υπόγειο νερό μπορεί να προκαλέσει βιοσυσσώρευση στην τροφική αλυσίδα [19].

Μέθοδος απορρύπανσης εδάφους	Κόστος (\$/τόνο εδάφους)
Χημική επεξεργασία	100-500
Ηλεκτροκινητική μέθοδος	20-200
Φυτοεξαγωγή	5-40

Πίνακας 1.2. Κόστη εδαφικής επεξεργασίας [16].

Η δυσκολία που παρουσιάζεται στον υπολογισμό του κόστους εφαρμογής της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης αντικατοπτρίζει τη μοναδική περίπτωση που αποτελεί η κάθε ρυπασμένη περιοχή, με βάση τις φυσικοχημικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Στα μειονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας

συγκαταλέγονται και η αδυναμία πρόβλεψης της απόδοσής της, η εφαρμογή της σε σχετικά περιορισμένο βάθος ρύπανσης, η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της και η εξάρτηση της από τις φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής (θερμοκρασία, υψόμετρο, τύπος εδάφους).

1.1. Μηχανισμοί

Οι βασικότεροι μηχανισμοί που διέπουν την τεχνολογία της Φυτοεξυγίανσης διακρίνονται σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (E.P.A.) σε επτά κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής:

- **Φυτοεξαγωγή (phytoextraction).** Ορίζεται ως ο μηχανισμός πρόσληψης ρυπαντών από το ριζικό σύστημα των φυτών και μεταφοράς του στο φυτικό ιστό. Η απομάκρυνση των ρυπαντών από το πεδίο πραγματοποιείται με την συγκομιδή συνήθως του υπέργειου τμήματος των φυτών (βλ. Κεφάλαιο 2).
- **Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration).** Κατά την διεργασία αυτή πραγματοποιείται προσρόφηση ή κατακράτηση από το ριζικό σύστημα των φυτών, των διαλυμένων γύρω από την ζώνη επίδρασής του στοιχείων, εξαιτίας βιοτικών ή αβιοτικών διεργασιών. Τόσο η πρόσληψη από το φυτό, η μεταφορά αλλά και η συσσώρευση του ρύπου εξαρτάται από την φύση αυτού. Κατά την ριζοδιήθηση, πραγματοποιείται αρχικά από το φυτό παρεμπόδιση της μετακίνησης του ρύπου, που έχει σαν αποτέλεσμα την ακινητοποίηση και συσσώρευσή του πάνω ή μέσα στη ρίζα αυτού. Η απομάκρυνση του ρύπου πραγματοποιείται με την συγκομιδή του φυτού. Η μέθοδος αυτή προτιμάται κυρίως για την επεξεργασία υπόγειων υδάτων, επιφανειακών υδάτων και υγρών αποβλήτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι για να είναι επιτυχής η εφαρμογή της απαιτείται ο ρύπος να είναι σε διαλυμένη μορφή, δεν

συνηθίζεται να εφαρμόζεται σε εδάφη χαμηλά σε περιεκτικότητα νερού. Κυρίως ενδείκνυται για εδάφη ελαφρώς ρυπασμένα.

- **Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization).** Πρόκειται για τον μηχανισμό εκείνο, κατά τον οποίο πραγματοποιείται σταθεροποίηση του ρύπου στο έδαφος. Ο τελευταίος μπορεί είτε να απορροφηθεί και να συσσωρευτεί στο ριζικό σύστημα, είτε να προσροφηθεί σε αυτό ή απλά να κατακρατηθεί στην ζώνη επίδρασης της ρίζας του φυτού. Η φυτοσταθεροποίηση, βασίζεται στις χημικές και μικροβιολογικές ιδιότητες της ζώνης επίδρασης του ριζικού συστήματος. Βέβαια, αν και αποτελεί τεχνολογία αρκετά χαμηλού κόστους, απαιτείται μακροχρόνια συντήρηση και παρακολούθηση, για την αποφυγή της απελευθέρωσης του ρύπου.
- **Ριζοαποικοδόμηση (Rhizodegradation).** Βασίζεται στην ύπαρξη των μικροοργανισμών που δρουν στο ριζικό σύστημα του φυτού και επιτυγχάνουν την αποικοδόμηση των οργανικών ρύπων, χρησιμοποιώντας τους ως πηγή άνθρακα στα μεταβολικά τους μονοπάτια. Οι εκκρίσεις των φυτών που απελευθερώνονται από τη ρίζα (σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, λίπη, ένζυμα κ.α.), βοηθούν στην αύξηση του μικροβιακού πληθυσμού και μαζί με το συνεχώς αναπτυσσόμενο ριζικό σύστημα που δημιουργεί επιπλέον εστίες συγκέντρωσης, συντείνουν στην δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για αποικοδόμηση οργανικού φορτίου. Πρόκειται για μια αρκετά οικονομική μέθοδο Φυτοεξυγίανσης, που όμως απαιτεί αρκετό

χρονικό διάστημα εφαρμογής, αφού απαιτεί ανάπτυξη ώριμου ριζικού συστήματος.

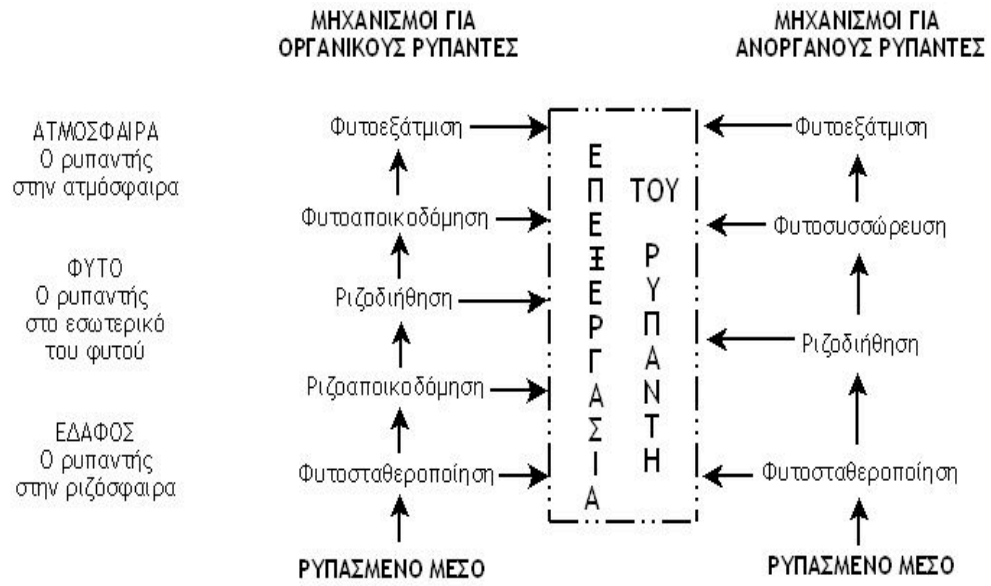
- **Φυτοαποικοδόμηση (Phytodegradation)** ή αλλιώς **Φυτομετατροπή (Phytotransformation)**. Ονομάζεται η διεργασία διάσπασης ρύπων, τόσο εντός του φυτού μέσω των διεργασιών του μεταβολισμού του, όσο και εκτός του φυτού μέσω επίδρασης των συστατικών που αυτό εκκρίνει, όπως π.χ. τα ένζυμα. Η ριζοαποικοδόμηση αποτελεί μέρος της φυτοαποικοδόμησης. Για να συμβεί φυτοαποικοδόμηση μέσα στο φυτό πρέπει αρχικά να πραγματοποιηθεί η πρόσληψη του ρύπου από το φυτό, η οποία εξαρτάται από το είδος του φυτού, από τη φύση του ρύπου και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε εδάφη που η συγκέντρωση των ρύπων είναι τοξική για τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Ωστόσο έχει το μειονέκτημα ότι λόγω του δύσκολου εντοπισμού των μεταβολιτών εντός του φυτού, είναι επίσης δύσκολο να επιβεβαιωθεί η διάσπαση του ρύπου.
- **Φυτοεξάτμιση (Phytonovolatilization)**. Πρόκειται για την διεργασία κατά την οποία ο ρύπος, αφού προσληφθεί από το φυτό, μεταφέρεται στο υπέργειο τμήμα του και μέσω των διεργασιών του μεταβολισμού και της διαπνοής εκλύεται στην ατμόσφαιρα είτε στην αρχική του μορφή είτε σε τροποποιημένη, συνήθως λιγότερο τοξική. Οι ρύποι μπορούν έπειτα να υποστούν στην ατμόσφαιρα επιπλέον μεταβολές με διεργασίες φυσικές, όπως π.χ. η φωτοδιάσπαση. Η

φυτοαποικοδόμηση σχετίζεται άμεσα με την φυτοεξάτμιση, αφού και οι δύο μηχανισμοί μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για την απορρύπανση υπογείων υδάτων και λασπωδών αποβλήτων. Μειονέκτημα αυτής είναι το γεγονός ότι ο ρύπος, έχοντας απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα μπορεί εκ νέου να συσσωρευτεί στην υπάρχουσα βλάστηση και να δημιουργήσει ξανά πρόβλημα ρύπανσης.

- **Υδραυλικός έλεγχος (Hydraulic control).** στην μέθοδο της φυτοεξυγίανσης πραγματοποιείται με την χρήση φυτών, ικανών να προσλάβουν σημαντικές ποσότητες υπογείου ύδατος, με σκοπό τον περιορισμό της μεταφοράς των ρύπων. Σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής παίζουν οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες, αφού εμποδίζουν την σταθερή πρόσληψη νερού από τα φυτά. Παρόλα αυτά το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας είναι πολύ μικρό αφού δεν απαιτείται σύστημα εγκατάστασης αντλιών για την τροφοδοσία των φυτών με νερό [7].

Οι παραπάνω μηχανισμοί που επιστρατεύουν τα φυτά κατά την διάρκεια της έκθεσής τους στους εκάστοτε ρύπους μπορούν να επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος του ρύπου σε:

- Μηχανισμούς μέσω των οποίων λαμβάνει χώρα φυτοεξυγίανση οργανικών ρυπαντών.
- Μηχανισμούς μέσω των οποίων λαμβάνει χώρα φυτοεξυγίανση ανόργανων ρυπαντών.



Διάγραμμα 1.1. Μηχανισμοί εξυγίανσης κατά την μεταφορά του ρύπου από το έδαφος στο φυτό και στη συνέχεια στην ατμόσφαιρα [9]

1.2. Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης

Ο σχεδιασμός των συστημάτων της φυτοεξυγίανσης διαφοροποιείται και εξαρτάται άμεσα από το είδος του ρυπαντή, τις συνθήκες που επικρατούν στο προς απορρύπανση πεδίο, το επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του ρύπου που απαιτείται και από το είδος των φυτών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ένας ενδελεχής σχεδιασμός θα πρέπει να περιλαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα για το σχεδιασμό οποιουδήποτε συστήματος εξυγίανσης.

Οι παράμετροι σχεδιασμού διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται. Ο σχεδιασμός, για παράδειγμα, ενός συστήματος που θα χρησιμοποιεί τον μηχανισμό της φυτοεξαγωγής σαφώς διαφέρει από αυτόν ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τον μηχανισμό της Ριζοαποικοδόμησης. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου της φυτοεξυγίανσης υπάρχουν ορισμένες παράμετροι σχεδιασμού που είναι κοινοί και που μπορούν να προσδιοριστούν. Ο χαρακτηρισμός του πεδίου περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται, έτσι ώστε να μπορέσει ο σχεδιαστής να αναπτύξει ένα κατάλληλα λειτουργικό σύστημα. Οι παράμετροι σχεδιασμού περιλαμβάνουν:

1. Προσδιορισμό του επιπέδου της ρύπανσης.

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος φυτοεξυγίανσης, πρέπει να προσδιοριστεί το είδος και η συγκέντρωση των επιλεχθέντων για απορρύπανση ρυπαντών καθώς και το βάθος της ρυπογόνου ζώνης. Υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ρυπαντών ίσως αποτρέψουν την επιλογή της φυτοεξυγίανσης ως κατάλληλης μεθόδου. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών θα πρέπει να υπάρχουν στοιχεία

για τη σύστασή τους καθώς και για την ικανότητα προσρόφησης τους.

2. Επιλογή του κατάλληλου είδους φυτού.

Η επιλογή του κατάλληλου φυτού για την αποκατάσταση ενός ρυπασμένου πεδίου αποτελεί παράγοντα καθοριστικό για την επιτυχία της μεθόδου και πραγματοποιείται με βάση τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την συμβατότητα του φυτού με τις συνθήκες που επικρατούν στο προς εξυγίανση πεδίο (γενικά προτιμώνται τοπικά φυτά, ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν μικρότερη όχληση του φυσικού περιβάλλοντος).
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους και της υφιστάμενης ρύπανσης.
- Το βάθος της ρυπασμένης περιοχής (σε περιοχή που ο ρυπαντής βρίσκεται σε μεγάλο βάθος απαιτείται χρήση φυτών με βαθύ ριζικό σύστημα).
- Την ικανότητά του φυτού να αναπτύσσεται με γρήγορο ρυθμό, να παρουσιάζει υψηλούς ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής και να μετατρέπει το ρυπαντή σε μη τοξικά παράγωγα.
- Την ικανότητα που έχει ένα φυτό να συσσωρεύει βαρέα μέταλλα ή να τα μεταφέρει ενδεχομένως στο υπέργειο τμήμα του. Η ικανότητα αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με τη βοήθεια δύο παραγόντων: του Bioconcentration Factor (BF) και του Translocation Factor(TF). Ο BF ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης των μετάλλων στο ριζικό σύστημα του φυτού προς την συγκέντρωση αυτών στο έδαφος, ενώ ο TF ορίζεται

ως ο λόγος της συγκέντρωσης των μετάλλων στο υπέργειο τμήμα το φυτού προς την συγκέντρωση αυτών στη ρίζα του. Συγκρίνοντας λοιπόν τους δύο αυτούς παράγοντες μπορεί να εκτιμηθεί η ικανότητα διαφορετικών φυτών να προσλαμβάνουν ρύπους και να τους μεταφέρουν στο υπέργειο τμήμα τους (όπως π.χ. απαιτεί ο μηχανισμός της φυτοεξαγωγής). Τα φυτά που εμφανίζουν για τους παράγοντες αυτούς και κυρίως για τον BF τιμές μικρότερες της μονάδας δεν είναι κατάλληλα για φυτοεξυγίανση [20].

3. Έλεγχος της δυνατότητας χρησιμοποίησης των επιλεχθέντων φυτών.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται για να επιβεβαιώσει ότι το επιλεχθέν σύστημα φυτοεξυγίανσης θα επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της τοξικότητας των ρυπαντών καθώς και προϊόντων που προκύπτουν από την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης. Επιπροσθέτως, καθορίζεται το τμήμα που ενδέχεται να εντοπιστούν οι ρυπαντές εντός του συστήματος του φυτού και πραγματοποιούνται έλεγχοι σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ρύπου σε συγκεκριμένα φυτικά είδη με σκοπό την πρόβλεψη της ποσότητας και του είδους των παραγόμενων προϊόντων του μεταβολισμού.

4. Άρδευση, αγρονομικές παράμετροι σχεδιασμού και συντήρηση του συστήματος της φυτοεξυγίανσης.

Η άρδευση των φυτών εξασφαλίζει την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος της φυτοεξυγίανσης ακόμη και σε συνθήκες ξηρασίας. Σημαντική είναι και η πραγματοποίηση υδρολογικής μελέτης του

υπογείου υδροφορέα της εκάστοτε περιοχής, ώστε να εκτιμηθεί η στάθμη του σε συνθήκες άρδευσης. Στον υπολογισμό των αγρονομικών παραμέτρων σχεδιασμού περιλαμβάνονται αναλύσεις του εδάφους για τον προσδιορισμό των απαραίτητων συγκεντρώσεων συστατικών για την θρέψη των φυτών (π.χ. φώσφορος, άζωτο).

Η συντήρηση του συστήματος της Φυτοεξυγίανσης περιλαμβάνει την προσθήκη κατάλληλων λιπασμάτων για τη γρήγορη ανάπτυξη των φυτών (αν αυτά είναι απαραίτητα) και σε ορισμένες περιπτώσεις την αντιμετώπιση βιολογικών εχθρών των φυτών (π.χ. χρήση εντομοκτόνων). Για ορισμένα τοξικά μέταλλα (όπως ο μόλυβδος) τα οποία παρουσιάζουν χαμηλή διαλυτότητα και δυσκολία πρόσληψης από τις ρίζες, επιλέγεται πολλές φορές η προσθήκη στο έδαφος κατάλληλων χηλικών ενώσεων καθώς και η μείωση του pH του εδάφους, με στόχο την αύξηση της βιοσυσσώρευσης του μετάλλου στο φυτό.

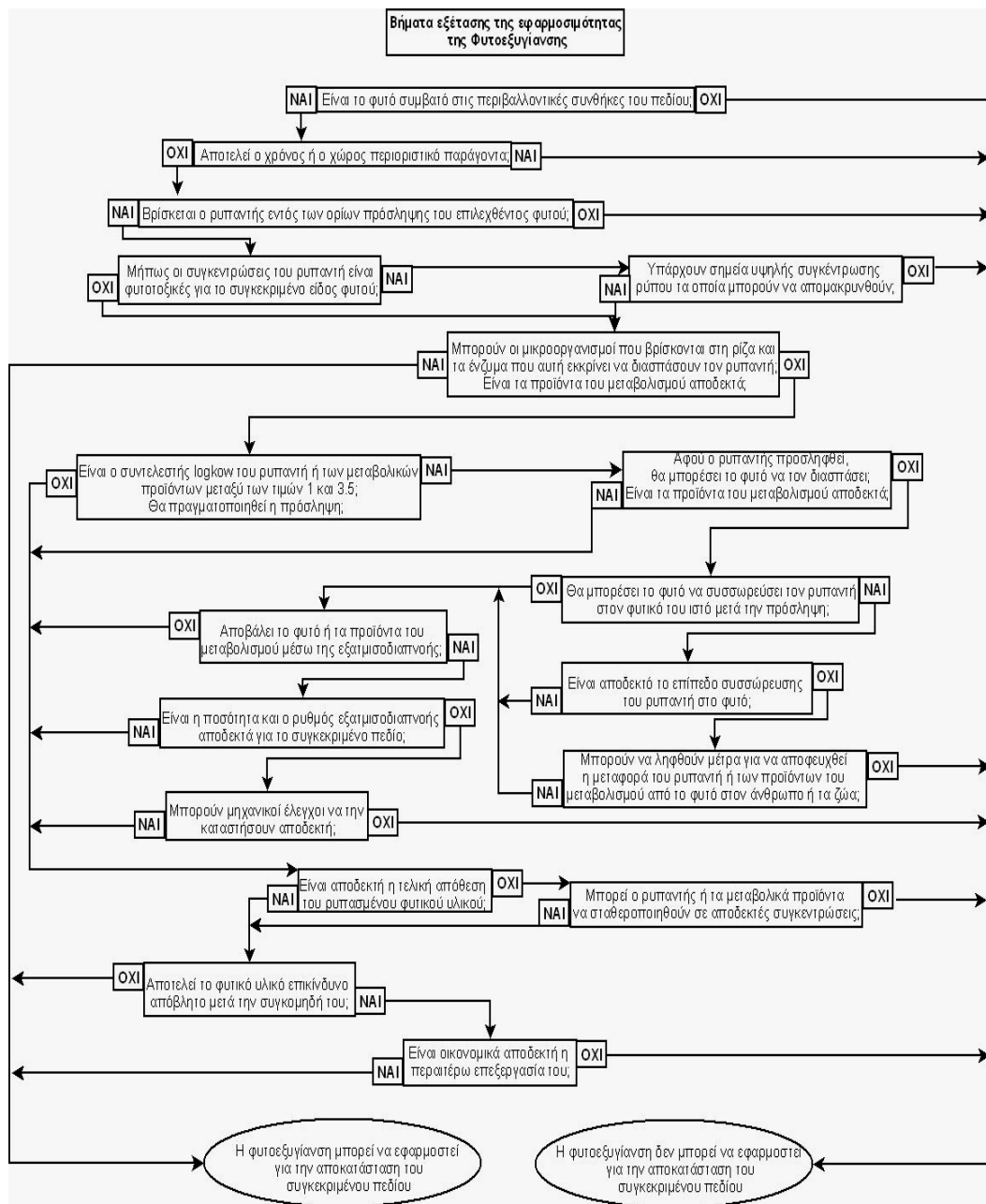
5. Συγκομιδή του φυτικού υλικού.

Μετά το πέρας της εφαρμογής πρέπει να πραγματοποιηθεί η συγκομιδή των φυτών. Η ακόλουθη επεξεργασία του φυτικού υλικού εξαρτάται από τη φύση και την συγκέντρωση του ρύπου στα φυτικά κύτταρα. Όταν πρόκειται για οργανικούς ρυπαντές που διασπώνται σε μη τοξικές ουσίες δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού. Στην περίπτωση όμως που πρόκειται για ανόργανους ρυπαντές και ιδίως βαρέα μέταλλα, η συνηθέστερη διαδικασία επεξεργασίας του φυτικού υλικού είναι η Ελεγχόμενη Καύση (Controlled Incineration), η Κομποστοποίηση

(Composting) καθώς και Διάθεση σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Επικίνδυνων Απόβλητων (Landfilling) [19].

1.3. Βήματα εξέτασης της εφαρμοσιμότητας της Φυτοεξυγίανσης

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα για την λήψη της τελικής απόφασης της εφαρμογής της τεχνολογίας της Φυτοεξυγίανσης σε ρυπασμένο πεδίο. Τα κλίμα, το είδος και η θέση του υφιστάμενου ρύπου αποτελούν τις βασικότερες παραμέτρους που πρέπει να εξεταστούν για την εφαρμογή της (βλ. Διάγραμμα 1.2).



Διάγραμμα 1.2. Βήματα εξέτασης της εφαρμοσιμότητας της φυτοεξυγίανσης σε ένα συγκεκριμένο ρυπασμένο πεδίο [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗ

Φυτοεξαγωγή (Phytoextraction) ή αλλιώς Φυτοσυσσώρευση (phytoaccumulation), είθισται να καλείται η διεργασία αυτή κατά την οποία το φυτό προσλαμβάνει τον ρύπο μέσω του ριζικού του συστήματος και τον μεταφέρει στο υπέργειο τμήμα του, όπου και τον ακινητοποιεί. Η πρώτη δοκιμή της μεθόδου στο πεδίο, πραγματοποιήθηκε το 1991 [21] ενώ σύγχρονες εφαρμογές της στο πεδίο, την κατατάσσουν στις πλέον υποσχόμενες σύγχρονες τεχνολογίες απορρύπανσης εδάφους, με βασικό προτέρημά της έναντι των υπολοίπων το χαμηλό κόστος εφαρμογής. Η Φυτοεξαγωγή, αποτελεί ουσιαστικά έναν από τους επτά μηχανισμούς της Φυτοεξυγίανσης (βλ. Κεφάλαιο 1.1) και διακρίνεται σε δύο στρατηγικές [22] :

- ο την Εντεινόμενη Φυτοεξαγωγή (Induced Phytoextraction) και
- ο την Συνεχή Φυτοεξαγωγή (Continuous Phytoextraction).

Η Εντεινόμενη Φυτοεξαγωγή, χρησιμοποιείται στην περίπτωση ρύπανσης του εδάφους από βαρέα μέταλλα. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται η εγκατάσταση των φυτών και αφού επιτευχθεί η μέγιστη βιομάζα πραγματοποιείται η προσθήκη στο έδαφος κατάλληλων χηλικών ενώσεων. Για ορισμένα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος (Pb), ένας σημαντικός παράγοντας που επιβραδύνει την διαδικασία της πρόσληψης αυτών είναι η περιορισμένη διαλυτότητα

και βιοδιαθεσιμότητά τους. Ένας τρόπος να ενισχυθεί η διαλυτότητά τους είναι να μειωθεί το pH του εδάφους. Ωστόσο, η κινητικότητα που θα προσδώσει η μείωση αυτή στον ρυπαντή, μπορεί να επιφέρει και αρνητικά αποτελέσματα, αφού ακόμα κι αν προσληφθεί από το φυτό, υπάρχει περίπτωση να διηθηθεί ξανά από την ρίζα του φυτού στο

έδαφος. Η χρήση λοιπόν χηλικών ενώσεων έχει αποδειχθεί ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος ενίσχυσης της πρόσληψης των μετάλλων από τα φυτά. Οι ενώσεις αυτές, εμποδίζουν την ιζιματοποίηση των μετάλλων και τα διατηρούν σε μορφή διαλυτών χηλικών συμπλόκων, έτοιμων να προσληφθούν από τα φυτά και να μεταφερθούν στο υπέργειο τμήμα τους. Για παράδειγμα, η προσθήκη EDTA (ethylene-diamine-tetracetic acid), σε συγκέντρωση 10 mmol/kg εδάφους, ενέτεινε την συσσώρευση Pb στους ιστούς καλαμποκιού κατά 1.6% [4]. Σε αντίστοιχη έρευνα, διαπιστώθηκε ότι η έκθεση του φυτού *Indian Mustard* σε Pb, παρουσία EDTA, σε υδροπονικές συνθήκες καλλιέργειας, επέφερε συσσώρευση πάνω από 1% του ξηρού βάρους του ιστού[4]. Το 1996, οι Huang και Cunningham διαπίστωσαν ότι παρουσία HEDTA (hydroethyl-ethylenediamine-triacetic acid) σε 2.0 gr/kg εδάφους ρυπασμένου με 2.500 ppm Pb, αύξησε την συγκέντρωση του Pb στο υπέργειο τμήμα του φυτού *Indian Mustard* από 40ppm σε 10.600 ppm Pb [4].

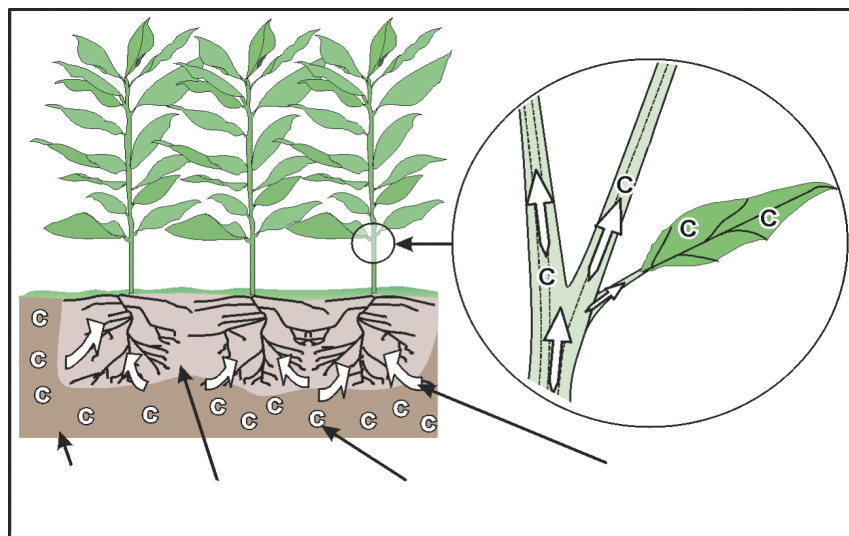
Οι Blaylock *et al.* (1997), επεσήμαναν ότι εκτός από τον Pb, η Εντεινόμενη Φυτοεξαγωγή μπορεί να είναι εφαρμόσιμη και σε άλλα βαρέα μέταλλα. Απέδειξαν ότι η παρουσία EDTA, επιδρούσε αντίστοιχα και στη συσσώρευση των μετάλλων Cd, Cu, Ni και Zn [4].

Αντίθετα, η Συνεχής Φυτοεξαγωγή στηρίζεται στις φυσικές ιδιότητες των υπερσυσσωρευτών για την πρόσληψη μετάλλων. Στην περίπτωση αυτή τα φυτά προσλαμβάνουν και συσσωρεύουν τα μέταλλα στη βιομάζα τους σε όλη την διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου.

Η Φυτοεξαγωγή ενδείκνυται συνήθως για αποκατάσταση εδαφών που έχουν ρυπανθεί από μέταλλα (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb και Zn), ραδιονουκλεοτίδια (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{234}U) και από

περιορισμένο αριθμό οργανικών ενώσεων (π.χ. πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες) [24].

Τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα της Φυτοεξυγίανσης βαρέων μετάλλων, με τη δημιουργία εταιριών [Earthcare, Ecolotree, Bioplanta], οι οποίες προσφέρουν υπηρεσίες σε εμπορική κλίμακα. Η χρησιμοποίηση φυτών για την επεξεργασία βαρέων μετάλλων παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την αντίστοιχη των οργανικών ρυπαντών [26]. Τα βαρέα μέταλλα είναι ουσίες οι οποίες παραμένουν σχετικά αμετάβλητες χωρίς να υφίστανται σημαντικές βιολογικές και φυσικοχημικές μεταβολές και επομένως η ανίχνευση και ο προσδιορισμός τους παρουσιάζει σχετική ευκολία σε σχέση με τους οργανικούς ρυπαντές.



Εικόνα 2.1. Φυτοσυσσώρευση ανόργανων ρυπαντών στο υπέργειο τμήμα φυτών [25].

Η εφαρμογή της Φυτοεξαγωγής προϋποθέτει την φύτευση ενός ή περισσότερων ειδών φυτών, τα οποία θα πρέπει να έχουν γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης, μεγάλη παραγωγή βιομάζας και να ανήκουν στην

κατηγορία των υπερσυσσωρευτών. Ως υπερσυσσωρευτές χαρακτηρίζονται τα φυτά εκείνα που έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα σε εκατοσταπλάσιες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη φυτών.

Ο όρος υπερσυσσωρευτής πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον Jaffre *et al.* το 1976. Ωστόσο, το 1977 οι Brooks *et al.* εισήγαγαν ένα νέο ορισμό που χαρακτήριζε ως υπερσυσσωρευτές τα φυτά τα οποία είχαν την ικανότητα να συγκεντρώνουν 1000 mg/kg (0.1%) στον ιστό τους, βασιζόμενοι σε μελέτη που αφορούσε στην συγκέντρωση του Ni στα φυτά του είδους *Homalium* και *Hybanthus* σε διάφορες περιοχές στον κόσμο [24].

Είδος μετάλλου	Συγκέντρωση μετάλλου (%) στον ιστό των φύλλων του φυτού	Αριθμός οικογενειών φυτών	Αριθμός είδους φυτών
Κάδμιο (Cd)	>0.01	1	1
Χρώμιο (Cr)	>0.05	5	2
Χαλκός (Cu)	>0.1	16	35
Νικέλιο (Ni)	>0.1	36	151
Ψευδάργυρος (Zn)	>1.0	5	13

Πίνακας 2.1. Αριθμός υπερσυσσωρευτών 5 συγκεκριμένων μετάλλων [24].

Ωστόσο, βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο (Cd) και το χρώμιο (Cr), όντας πολύ πιο τοξικά για τα φυτά συγκριτικά με το νικέλιο (Ni), ανάγκασαν τους επιστήμονες σύντομα να διαπιστώσουν ότι το κριτήριο αυτό δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί για όλα τα μέταλλα εξίσου. Τα τελευταία χρόνια, οι Baker *et al.* καθιέρωσαν ότι η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στον φυτικό ιστό ξηρών φύλλων θα μπορούσε να αποτελέσει κριτήριο για την διάκριση των φυτών σε υπερσυσσωρευτές και μη [26]. Για παράδειγμα, φυτά τα

οποία περιέχουν περισσότερο από 0.01% Cd ή περισσότερο από 0.05% Cr (100 και 500 mg/kg αντίστοιχα) στο φυτικό ιστό των ξηρών τους φύλλων μπορούν να θεωρηθούν υπερσυσσωρευτές των μετάλλων αυτών [24]. Οι ίδιοι ερευνητές πρόσθεσαν ότι η τιμή της συγκέντρωσης αυτών των μετάλλων θα πρέπει να είναι μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που παρουσιάζεται στα ξηρά φύλλα των φυτών που δε είναι υπερσυσσωρευτές. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάστηκαν ενδεικτικά οι τιμές ορισμένων μετάλλων, τις οποίες αν το φυτό υπερβεί μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπερσυσσωρευτής, καθώς και ο αριθμός των οικογενειών και ειδών των φυτών που έχει διαπιστωθεί η ικανότητά τους αυτή.

Έτσι, ένας υπερσυσσωρευτής μπορεί να συγκεντρώσει πάνω από 10 ppm Cd, 1000 ppm Co, Cr, Cu, Pb και 10,000 ppm Ni και Zn. Μέχρι σήμερα, περίπου 400 είδη φυτών που ανήκουν σε περίπου 45 οικογένειες έχουν καταχωρηθεί ως υπερσυσσωρευτές [24]. Στην πιο γνωστή κατηγορία υπερσυσσωρευτών μετάλλων ανήκουν τα φυτά του γένους *Thlaspi caerulescens* που αποτελούν μαζί με αυτά του γένους *Viola calaminaria* τα πρώτα φυτά που καταγράφηκαν ως υπερσυσσωρευτές [4]. Ενώ τα περισσότερα φυτά εμφανίζουν συμπτώματα τοξικότητας σε συγκεντρώσεις Zn γύρω στα 100 ppm, το φυτό *Thlaspi caerulescens* αποδείχθηκε ότι συσσωρεύει πάνω από 26,000 ppm χωρίς να παρουσιάζει καμιάς μορφής καταπόνηση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπερσυσσωρευτές είθισται να έχουν μεγαλύτερη απαίτηση σε μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος [27], συμπεριλαμβανομένου και του *Thlaspi caerulescens*, σε σχέση με τα υπόλοιπα φυτά. Παρακάτω παρουσιάζονται οικογένειες γνωστών υπερσυσσωρευτών για συγκεκριμένα μέταλλα.

Βαρέα μέταλλα	Οικογένεια
---------------	------------

Κάδμιο (Cd)	Brassicaceae
Κοβάλτιο (Co)	Lamiaceae, Scrophulariaceae
Χαλκός (Cu)	Cyperaceae, Lamniaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
Μαγγάνιο (Mn)	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Νικέλιο (Ni)	Brassicaceae, Violaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Σελήνιο (Se)	Fabaceae
Θάλλιο (Tl)	Brassicaceae
Ψευδάργυρος (Zn)	Brassicaceae, Violaceae

Πίνακας 2.2. Οικογένειες στις οποίες ανήκουν γνωστοί υπερσυσσωρευτές συγκεκριμένων μετάλλων [28].

Ορισμένες εβδομάδες ή μήνες έπειτα από τη φύτευσή των φυτών, πραγματοποιείται συγκομιδή δείγματος φυτικού υλικού με σκοπό την πραγματοποίηση αναλύσεων που έχουν σαν στόχο τον υπολογισμό του περιεχομένου τους σε βαρέα μέταλλα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών υποδεικνύουν αν η εφαρμογή έχει φτάσει στο τέλος της και έπειτα ακολουθεί η τελική συγκομιδή των φυτών. Σε πολλές περιπτώσεις, η διαδικασία της φυτοεξαγωγής επαναλαμβάνεται, έτσι ώστε να μειωθούν περισσότερο τα επίπεδα της συγκέντρωσης του ρύπου στο προς εξυγίανση πεδίο ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται διάφορα είδη φυτών στο ίδιο πεδίο είτε την ίδια περίοδο ή σε αλληλουχία. Το συλλεχθέν φυτικό υλικό οδηγείται είτε για Αποτέφρωση είτε για Κομποστοποίηση, που έχει σαν στόχο την ανακύκλωση των μετάλλων. Στην πρώτη περίπτωση, το προϊόν της Αποτέφρωσης πρέπει να μεταφερθεί σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Επικίνδυνων Αποβλήτων. Σύμφωνα με την EPA (Environmental Protection Agency), ο όγκος που παράγεται είναι λιγότερο από 10%

από τον όγκο που θα παραγόταν αν στο ρυπασμένο έδαφος είχε εφαρμοστεί κάποια άλλη τεχνολογία αποκατάστασης εδαφών η οποία θα απαιτούσε την εκσκαφή του υπό αποκατάσταση εδάφους [2].

2.1. Πλεονεκτήματα

Η φυτοεξαγωγή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα εξής:

- Το κόστος εφαρμογής της εν λόγω τεχνολογίας είναι πολύ χαμηλό και δεν απαιτεί την χρήση εξοπλισμού ή την κατανάλωση ενέργειας.
- Είναι περιβαλλοντικά φιλική στο περιβάλλον τεχνολογία, αφού δεν παράγει σημαντικά απόβλητα.
- Αφήνει πολύ μικρότερη προς διάθεση μάζα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες απορρύπανσης εδαφών όπως για παράδειγμα αυτή της Εδαφικής Πλύσης που απαιτείται εκσκαφή του υπό αποκατάσταση εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, η βιομάζα των φυτών μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, βιομάζα που περιέχει σελήνιο (Se), σημαντικό στοιχείο στη σύσταση του εδάφους, έχει μεταφερθεί σε περιοχές που στερούνται αυτού του στοιχείου και σε ορισμένες περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί και ως τροφή για ζώα [29]. Επίσης η βιομάζα των φυτών μπορεί να μετατραπεί σε ακατέργαστο υλικό για δραστηριότητες όπως η κατασκευή επίπλων και η παραγωγή ενέργειας.
- Δεν απαιτεί την εκσκαφή του εδάφους, αφού πρόκειται για *in situ* τεχνολογία και διατηρεί με τον τρόπο αυτό το φυσικό κάλλος του τοπίου.
- Είναι αισθητικά ευχάριστη.

- Μπορεί να είναι αποτελεσματική για μεγάλη ποικιλία ρύπων.
- Εκτός από το να απορρυπαίνει το έδαφος και να αποτρέπει την εξάπλωση των υφιστάμενων ρύπων, ταυτόχρονα προστατεύει το έδαφος από την διάβρωση.

2.2. Μειονεκτήματα

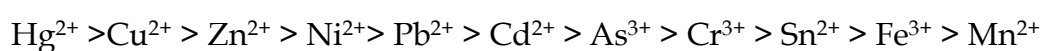
Όπως κάθε μέθοδος βιολογικής επεξεργασίας, η εφαρμογή της φυτοεξαγωγής υπόκειται και σε ορισμένους περιορισμούς που εμποδίζουν την αποτελεσματικότητά της. Μερικά από τα βασικότερα μειονεκτήματά της είναι τα εξής:

- Το βάθος ζώνης επεξεργασίας είναι περιορισμένο, με αποτέλεσμα η εφαρμογή της να ενδείκνυται μόνο για επιφανειακά ρυπασμένα εδάφη.
- Οι υπερσυσσωρευτές είναι συνήθως φυτά με μικρή βιομάζα.
- Η απόδοσή της εξαρτάται κατά ένα σημαντικό βαθμό από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, το είδος του εδάφους, το pH, την αλατότητα και την συγκέντρωση του εκάστοτε ρυπαντή.
- Απαιτεί μεγάλο χρόνο εξυγίανσης. Τα φυτά προσλαμβάνουν μικρές ποσότητες ρυπαντών κάθε έτος και μπορεί να χρειαστεί μερικές δεκαετίες για την επαρκή απορρύπανση ενός πεδίου.
- Δεν είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση προσροφημένων στα εδαφικά σωματίδια ρύπων.
- Εμπεριέχει κίνδυνο αρνητικής επίδρασης στην τροφική αλυσίδα, στην περίπτωση που τα χρησιμοποιούμενα φυτά αποτελέσουν τροφή ανωτέρων οργανισμών.
- Δεν είναι πάντα εύκολη η απόθεση των ρυπασμένων φυτών καθώς και η ανάκτηση των μετάλλων που έχουν συσσωρευτεί στους φυτικούς τους ιστούς [29].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Με τον όρο «βαρέα μέταλλα», περιγράφεται η ομάδα μετάλλων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 20, στην οποία δεν περιλαμβάνονται τα αλκάλια και οι αλκαλικές γαίες (βλ. Κεφάλαιο 5.1). Τα βαρέα μέταλλα όχι μόνο έχουν την ικανότητα να συσσωρεύονται στους οργανισμούς και να εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα, αλλά παραμένουν σε τοξικές συγκεντρώσεις στο έδαφος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Εν δυνάμει τοξικά είναι και ορισμένα απαραίτητα ιχνοστοιχεία (όπως ο χαλκός, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος), εάν η συγκέντρωσή τους υπερβεί ορισμένα – χαμηλά συνήθως – όρια. Η σειρά τοξικότητας των βαρέων μετάλλων είναι η εξής:



Η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους, το είδος του μετάλλου, την ύπαρξη και συνεργιστική δράση άλλων μετάλλων και το είδος του οργανισμού.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που απαντώνται στο φυσικό περιβάλλον οφείλονται τόσο σε φυσικές όσο και σε ανθρωπογενείς πηγές. Γενικά, οι πηγές αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως φυσικές, γεωργικές, βιομηχανικές και αστικές [22].

Μία από τις πιο βασικές φυσικές πηγές βαρέων μετάλλων αποτελούν τα γεωλογικά υλικά. Η σύσταση και οι συγκεντρώσεις αυτών εξαρτώνται άμεσα από το είδος των πετρωμάτων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που δρουν σε αυτά. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα, αεροζόλ προερχόμενα από τους

ωκεανούς και η σκόνη που προέρχεται από έρημους μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες σιδήρου (Fe) κατατάσσονται επίσης στις φυσικές πηγές.

Στις πηγές μετάλλων ανθρωπογενούς προέλευσης ανήκουν η χρήση οργανικών και ανόργανων λιπασμάτων όπως και εντομοκτόνων για γεωργική δραστηριότητα ενώ η έντονη βιομηχανική δραστηριότητα (εξόρυξη πετρωμάτων, διύλιση, επεξεργασία πλαστικού και χαρτιού) αυξάνει τις συγκεντρώσεις των μετάλλων στην βιόσφαιρα.

Είδος ρυπαντή	Εύρος συγκέντρωσης στο έδαφος	Κρίσιμη συγκέντρωση στο έδαφος	Εύρος φυσιολογικής συγκέντρωσης στα φυτά	Εύρος συγκέντρωσης σε ρυπασμένα εδάφη
Μόλυβδος (Pb)	2-300	100-400	0.1-5	3.870-49.910
Κάδμιο (Cd)	0.01-2.0	3-8	0.1-3	11-317
Ψευδάργυρος (Zn)	1-900	70-400	2-400	109-70.480
Χρώμιο (Cr)	5-1500	75-100	0.2-5	47-8.450
Υδράργυρος (Hg)	0.01-0.5	0.3-5	0.1-9.5	100-400
Χαλκός (Cu)	2-250	60-125	5-25	52-50.900
Νικέλιο (Ni)	2-750	100	1-10	19-11.260

Πίνακας 3.1. Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στα φυτά. Οι τιμές δίνονται σε ppm ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) [24].

Αστικές πηγές μετάλλων περιλαμβάνουν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, η Αποτέφρωση των Αστικών Απορριμμάτων όπως και η απόθεσή τους σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ), η Καύση του άνθρακα και του πετρελαίου για παραγωγή ηλεκτρισμού και για θέρμανση αντίστοιχα [31].

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, τα βαρέα μέταλλα μπορούν να επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις στην φυσιολογία και μορφολογία των φυτών. Για παράδειγμα τα στοιχεία Cr, Ni και ο Pb, έχει διαπιστωθεί ότι μειώνουν την παραγωγή της χλωροφύλλης, ενώ τα στοιχεία Cd, Cu, Hg, Ni και Pb επηρεάζουν την επιφανειακή περιοχή των θηλακοειδών, εμποδίζουν την μεταφορά των ηλεκτρονίων και μειώνουν την ενζυματική δραστηριότητα και την παραγωγή της χλωροφύλλης. Ωστόσο, τα περισσότερα είδη φυτών έχουν αναπτύξει συγκεκριμένες στρατηγικές για να αντεπεξέρχονται στις αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος (βλ. Κεφάλαιο 5).

Βαρέα Μέταλλα	Επιπτώσεις στα φυτά
Κάδμιο (Cd)	Μειώνει την βλάστηση των καρπών, την ποσότητα των λιπιδίων, την ανάπτυξη, εντείνει την παραγωγή φυτοχηλατίνης.
Χρώμιο (Cr)	Μειώνει την ενζυμική δραστηριότητα και την ανάπτυξη του φυτού, προκαλεί καταστροφή των μεμβρανών, χλώρωση και βλάβη στο ριζικό σύστημα.
Χαλκός (Cu)	Εμποδίζει τη φωτοσύνθεση, την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή, μειώνει την επιφάνεια των θηλακοειδών.
Υδράργυρος (Hg)	Μειώνει την φωτοσυνθετική ικανότητα, την πρόσληψη του νερού και την δράση των αντιοξειδωτικών ενζύμων, συσσωρεύει φαινόλη και προλίνη
Νικέλιο (Ni)	Μειώνει την βλάστηση των καρπών, παραγωγή πρωτεϊνών, χλωροφύλλης και ενζύμων, αυξάνει ελεύθερες ρίζες αμινικών οξέων.
Μόλυβδος (Pb)	Μειώνει την παραγωγή χλωροφύλλης, την ανάπτυξη του φυτού, αυξάνει την υπεροξειδική δισμουτάση.
Ψευδάργυρος (Zn)	Μειώνει την τοξικότητα του Ni, την βλάστηση των καρπών, αυξάνει την ανάπτυξη του φυτού και τον λόγο ATP/χλωροφύλλη

Πίνακας 3.2. Βασικές επιπτώσεις βαρέων μετάλλων στα φυτά
[24]



3.1. Μόλυβδος (Pb)

Φυσικοχημικές ιδιότητες μολύβδου

Το χημικό στοιχείο μόλυβδος (Pb) ανήκει στην IVA ομάδα του περιοδικού πίνακα. Είναι ελαφρώς γυαλιστερό, ελατό και με μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα μέταλλο. Δεν έχει χαρακτηριστική γεύση ή μυρωδιά και στη φυσική του μορφή έχει γκριζογάλανες αποχρώσεις. Σχηματίζεται σε ιδιαίτερα οξειδωτικές συνθήκες και οι ανόργανες ενώσεις του δεν συναντώνται σε φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος. Ο ατομικός του αριθμός είναι 82, το ατομικό του βάρος 207.2 και μπορεί να εντοπιστεί σε τρεις καταστάσεις οξείδωσης: Pb(0), ως μέταλλο Pb(II) και Pb(IV). Έχει σημείο τήξης 327.46 °C και σημείο βρασμού 1749 °C.

Αν και το στοιχείο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στη φύση συγκεντρώνεται κυρίως σε ευρέως κατανεμημένα ορυκτά αποθέματα στον φλοιό της Γης (π.χ. PbS, PbSO₄ και PbCO₃). Τα έντονα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν προκληθεί εξαιτίας του μολύβδου οφείλονται αφενός στο γεγονός ότι αποτελεί πολύ τοξικό μέταλλο και αφετέρου στο ότι έχει καθιερωθεί σε πολλές εφαρμογές, τόσο κατά την αρχαιότητα όσο και στην σύγχρονη τεχνολογία, εξαιτίας των σημαντικών ιδιοτήτων του όπως το χαμηλό σημείο τήξης και η ικανότητά του να αντιστέκεται στην διάβρωση. Η ευρεία του χρήση στην παραγωγή είναι προφανής από το γεγονός ότι ο ρυθμός εξαγωγής του από το έδαφος είναι δέκα φορές μεγαλύτερος από τον ρυθμό φυσικής αποσάθρωσης του εδάφους [33].

Ο μόλυβδος, όταν εκτεθεί στον αέρα και στο νερό, σχηματίζει στην επιφάνειά του σουλφιδικές και ανθρακικές ενώσεις όπως και οξείδια του μολύβδου, τα οποία λειτουργούν ως προστατευτικό κάλυμμα που καθυστερεί ή εμποδίζει την διάβρωση του μετάλλου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια αυτή [32]. Απαντάται στο έδαφος κυρίως σε ορυκτά, μαζί με τον ψευδάργυρο και κυρίως τον χαλκό. Το βασικότερο ορυκτό που περιέχει 86.6% σε μόλυβδο είναι το PbS , ενώ άλλα συνήθη ορυκτά που περιέχουν μόλυβδο είναι ο $PbCO_3$ και ο $PbSO_4$.

Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές μολύβδου είναι η μεταφορά σωματιδίων του εδάφους μέσω του ανέμου, οι φωτιές των δασών, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η διάβρωση των πετρωμάτων. Οι τελευταίες προκαλούν έκλυση μεγάλης ποσότητας σωματιδιακού υλικού και αεροζόλ υψηλής περιεκτικότητας σε μόλυβδο. Στις ανθρωπογενείς πηγές συμπεριλαμβάνονται η αυξημένη εξόρυξη μολύβδου, η χρήση πρόσθετων μολύβδου στην βενζίνη (η οποία έχει πλέον περιοριστεί αισθητά) και η καύση του άνθρακα.

Χρήσεις

Ο μόλυβδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην παραγωγή σωλήνων νερού ύδρευσης κατά τη ρωμαϊκή περίοδο και μέχρι το 1950 χρησιμοποιούνταν ευρύτατα σε πολλές χώρες. Ακόμη και σήμερα, σε πολλά μέρη του κόσμου μεγάλο μέρος των σωλήνων ύδρευσης είναι από μόλυβδο.

Ο μόλυβδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε στην καθαρή του μορφή είτε σε κράματα μετάλλων. Γνωστές ενώσεις μολύβδου είναι ο $PbCO_3$ και το PbO ως λευκή σκόνη που χρησιμοποιούνται στη

χρωματουργία καθώς και ο PbHAsO_4 που χρησιμοποιείται ως εντομοκτόνο [34].

Η βασική του χρήση είναι η παραγωγή μπαταριών αυτοκινήτων, καθώς και τετρααιθυλιούχου και τετραμεθυλιούχου μολύβδου που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στην βενζίνη και αποτελούσαν μέχρι πριν ορισμένα χρόνια μια από τις πιο σημαντικές πηγές ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Ο μόλυβδος χρησιμοποιείται επίσης στην παραγωγή χρωμάτων, στην υαλουργία, στην παρασκευή εντομοκτόνων, σε κράματα μετάλλων, στην παραγωγή σωληνώσεων και πολεμοφοδίων και ως μονωτικό δεξαμενών.

Η συνολική παγκόσμια παραγωγή μολύβδου από μεταλλεία έχει μειωθεί τα τελευταία τριάντα περίπου χρόνια από 3.4 εκατ. τόνους το 1970 σε 3.1 εκατ. τόνους το 2000. Παράλληλα, κατά την ίδια περίοδο, η παγκόσμια παραγωγή αυξήθηκε από 4.5 εκατ. σε περίπου 6.5 εκατ. τόνους. Η συνολική ετήσια παραγωγή μολύβδου ανήλθε το 2006 στους περίπου 8 εκατ. τόνους [34].

Επιπτώσεις στην υγεία

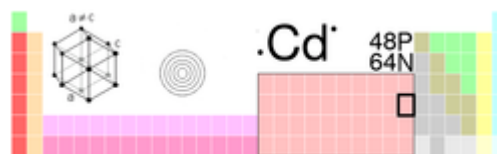
Ο μόλυβδος έχει καταχωρηθεί από την EPA (Environmental protection Agency) ως ένας από τους 129 άμεσης προτεραιότητας ρύπους και συμπεριλαμβάνεται στις 25 ουσίες που θεωρούνται ως οι πιο επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία.

Ο άνθρωπος εκτίθεται καθημερινά σε μικρές ποσότητες μολύβδου μέσω του αέρα που εισπνέει, της τροφής του και του πόσιμου νερού. Ο μόλυβδος που εισέρχεται στον οργανισμό με την αναπνοή κατακρατείται κατά 15-40%, με το νερό κατά 30-50% και με τις τροφές κατά 2-15%. Ο μόλυβδος που έχει απορροφηθεί από το σώμα εισέρχεται στο αίμα, όπου το 90% δεσμεύεται από τα ερυθρά

αιμοσφαίρια με μέσο χρόνο παραμονής τον ένα μήνα. Από το αίμα, το 15-50% του μολύβδου μεταφέρεται στους ιστούς, το 15% στα οστά και το υπόλοιπο αποβάλλεται. Ο χρόνος παραμονής του στους ιστούς είναι περίπου ένας μήνας με το μεγαλύτερο μέρος του να αποβάλλεται από τα μαλλιά και τον ιδρώτα. Ο μόλυβδος στα οστά μπορεί να παραμείνει 40-90 χρόνια, καθιστώντας έτσι τα οστά την πιο βασική αποθήκη μολύβδου του σώματος [33].

Η μικρής διάρκειας έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις μολύβδου μπορεί να προκαλέσει τάσεις εμετού, διάρροια, σπασμούς, κόμμα ή ακόμη και τον θάνατο. Ωστόσο, ακόμη και μικρές συγκεντρώσεις μολύβδου μπορούν να προκαλέσουν βλάβες, με τις πλέον ευαίσθητες κατηγορίες τα παιδιά και τις έγκυες γυναίκες. Τα σημαντικότερα μακροχρόνιας έκθεσης συμπτώματα σε χαμηλές συγκεντρώσεις μολύβδου, αν και μπορεί να μην είναι εμφανή, είναι επίσης αρκετά σοβαρά. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται η πρόκληση βλάβης στο κεντρικό νευρικό σύστημα, η νεφρική δυσλειτουργία και η αναιμία. Άλλα συμπτώματα είναι η ανορεξία, πόνοι στην κοιλιακή χώρα, απώλεια ύπνου και ο πονοκέφαλος.

Η έκθεση των παιδιών στον μόλυβδο μπορεί να είναι πιο σημαντική, γιατί αυτά απορροφούν πιο εύκολα μόλυβδο σε σχέση με τους ενήλικες. Ακόμα και μικρή έκθεση μπορεί να προκαλέσει διανοητικές βλάβες και προβλήματα συμπεριφοράς. Σημαντικές δυσλειτουργίες μπορεί να προκληθούν από την έκθεση σε μόλυβδο και κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης και κυρίως τους τελευταίους τρεις μήνες. Εκτός βέβαια από τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει ο μόλυβδος στον άνθρωπο, σημαντικές είναι και αυτές που προκαλεί στα φυτά (βλ. Κεφάλαιο 1.5.1) και στα ζώα.



3.2. Κάδμιο (Cd)

Φυσικοχημικές ιδιότητες καδμίου

Το χημικό στοιχείο κάδμιο (Cd) αποτελεί ένα από τα πιο τοξικά και επικίνδυνα μέταλλα. Ανήκει στην ομάδα IIB του περιοδικού πίνακα, στον οποίο τοποθετείται κάτω από τον ψευδάργυρο και πάνω από τον υδράργυρο, στοιχεία με τα οποία έχει πολλές κοινές ιδιότητες. Το καθαρό κάδμιο έχει μορφή μαλακού ασημόλευκου μετάλλου, είναι άοσμο και πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση. Δεν βρίσκεται στο περιβάλλον ως καθαρό μέταλλο, αλλά ως μεταλλευμα, ενωμένο με άλλα στοιχεία όπως το θείο. Ο ατομικός του αριθμός είναι 48, το ατομικό του βάρος 112.4 g/mol και στη φύση δύο καταστάσεις οξείδωσης είναι πιθανές (0 και +2). Ωστόσο, η μηδενική ή μεταλλική του κατάσταση είναι πολύ σπάνια [36]. Έχει σχετικά χαμηλό σημείο τήξης (320.9 °C) και σημείο βρασμού (765 °C) αλλά υψηλή τάση ατμών.

Στη φύση, το κάδμιο δεν εντοπίζεται στην καθαρή του μορφή και βρίσκεται στον φλοιό της Γης σε πολύ μικρή συγκέντρωση (0.2 mg/kg), συνήθως σε ορυκτά του ψευδαργύρου και αποτελεί βασικό υποπροϊόν της βιομηχανίας του, από την οποία η παραγωγή του εξαρτάται άμεσα. Πριν τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, δεν πραγματοποιούνταν ανάκτηση καδμίου από τα εργοστάσια ψευδαργύρου, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη ρύπανση του περιβάλλοντος για δεκαετίες. Η κατά μέσο όρο παγκόσμια ετήσια παραγωγή του ανήλθε από 20 τόνους που

υπολογιζόταν για την δεκαετία του 1920 σε 12.000 τόνους κατά την περίοδο 1960-1969 και σε 17.000 κατά την περίοδο 1970-1984 ενώ από το 1987 κυμαίνεται γύρω στους 20.000 τόνους [35].

Μπορεί επίσης να εντοπιστεί σε μορφή συμπλόκων όπως τα οξειδία και τα σουλφίδια. Τα τελευταία, όπως και το ανθρακικό κάδμιο είναι ενώσεις πρακτικά αδιάλυτες στο νερό. Μπορούν παρόλα αυτά να μετατραπούν σε διαλυτά στο νερό άλατα υπό την επίδραση οξυγόνου και οξέων. Το θειικό κάδμιο, το νιτρικό κάδμιο και οι ρίζες του καδμίου είναι ενώσεις διαλυτές στο νερό.

Το κάδμιο κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στον σχηματισμό διαφόρων αλάτων. Η κινητικότητά του και τα αποτελέσματα που επιφέρει η παρουσία του στο περιβάλλον, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση των αλάτων αυτών. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένα στοιχείο για την εμφάνιση στην φύση οργανικών ενώσεων του καδμίου, η φυσική του προέλευση μπορεί να ταυτιστεί μόνο με τα ανόργανα άλατά του. Το κάδμιο υπάρχει δεσμευμένο στις πρωτεΐνες και σε διάφορα άλλα οργανικά μόρια και σχηματίζει άλατα με οργανικά οξέα. Σε αυτές τις μορφές θεωρείται ανόργανος [36].

Οι ατμοί του καδμίου μπορούν να οξειδωθούν στον αέρα και έτσι παράγεται το οξείδιο του καδμίου. Όταν ατμοί όπως το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί, το διοξείδιο του θείου, το τριοξείδιο του θείου ή το υδροχλώριο είναι παρόντες, τότε αντιδρούν με αποτέλεσμα την παραγωγή ανθρακικού άλατος, υδροξειδίου, θειώδους και θειικού άλατος ή χλωριδίου του καδμίου. Τα άλατα αυτά μπορούν να συγκροτηθούν σε σωρούς και να εκλυθούν στο περιβάλλον.

Το κάδμιο απαντάται στο έδαφος στις ακόλουθες μορφές: Cd^{2+} , CdCl_2 , CdOH , CdHCO_3^+ , CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ και $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$, όπως

και σε μορφή οργανικών συμπλόκων. Οι πιο σημαντικές χημικές διαδικασίες που επηρεάζουν την συμπεριφορά και διαθεσιμότητα του καδμίου στο έδαφος είναι αυτές που αφορούν την προσρόφησή τους από την υγρή στην στερεή φάση. Αυτές οι διαδικασίες ελέγχουν τις συγκεντρώσεις των μεταλλικών ιόντων και συμπλόκων στο διάλυμα του εδάφους με αποτέλεσμα να επιδρούν και στην πρόσληψή τους από τις ρίζες των φυτών. Στους παράγοντες που επηρεάζουν την προσρόφηση του καδμίου ανήκουν το pH του εδάφους όπως και ο ανταγωνισμός με άλλα μεταλλικά ιόντα

Στους μηχανισμούς μεταφοράς καδμίου στο έδαφος περιλαμβάνεται και η εκρόφηση, η κατακρήμνιση, η συμπλοκοποίηση όπως και οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής και οξέος-βάσεως.

Οι κύριες φυσικές πηγές καδμίου που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα είναι η μεταφορά των σωματιδίων του εδάφους μέσω του ανέμου, οι φωτιές των δασών και οι ηφαιστειακές εκπομπές. Οι τελευταίες προκαλούν έκλυση μεγάλης ποσότητας σωματιδιακού υλικού και αεροζόλ υψηλής περιεκτικότητας σε κάδμιο [35]. Η διάβρωση των μεταλλευμάτων κατά την γεωλογική περίοδο, οδήγησε στον εμπλουτισμό των ιζημάτων με κάδμιο. Τα φωσφορικά άλατα έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε κάδμιο (περίπου 15 mg/kg). Για τα ανθρακωρυχεία και τον λιγνίτη, έχει αναφερθεί συγκέντρωση μικρότερη από 2 mg/kg ενώ η συγκέντρωση καδμίου στο ακατέργαστο πετρέλαιο είναι μικρότερη από 1 μg/kg και θεωρείται αμελητέα[36].

Στις κύριες ανθρωπογενείς πηγές καδμίου στα εδάφη περιλαμβάνονται τα στερεά απόβλητα, τα μεταλλεία, τα φωσφορικά λιπάσματα, η ιλύς από τα υγρά αστικά απόβλητα καθώς και οι

ατμοσφαιρικές αποθέσεις. Η ρύπανση που προέρχεται από τα απόβλητα μεταλλουργιών και τα υγρά απόβλητα από την επεξεργασία ορυκτών μπορούν επίσης να εμπλουτίσουν το υδάτινο περιβάλλον με κάδμιο. Τα στερεά απόβλητα τα οποία προέρχονται από μια ποικιλία ανθρώπινων δραστηριοτήτων εναποτίθενται σε χωματερές, οι οποίες μέχρι πρότινος δεν διέθεταν σύστημα στεγανοποίησης με άμεση συνέπεια, τη διοχέτευση καδμίου στο έδαφος σε μεγάλες συγκεντρώσεις.

Η χρήση φωσφορικών λιπασμάτων στην γεωργία αντιπροσωπεύει μία άμεση πηγή καδμίου στο έδαφος. Η συγκέντρωση του καδμίου σε αυτά ποικίλει και εξαρτάται από την προέλευση των φωσφορικών ορυκτών. Όλα τα πλαστικά τα οποία περιέχουν κάδμιο ή άλατα καδμίου με την ιδιότητα των σταθεροποιητών, μπορούν επίσης να αποτελέσουν πηγή καδμίου αν αποτεθούν ή αποτεφρωθούν [36].

Χρήσεις

Οι κυριότερες χρήσεις των ενώσεων του καδμίου κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες: Ως ενεργά υλικά ηλεκτροδίων στις μπαταρίες νικελίου-καδμίου (79% της συνολικής του χρήσης), ως χρωστικές ουσίες στα πλαστικά, στην κεραμική και στην υαλοποιία (11%), ως σταθεροποιητές πολυβινιλοχλωριδίων (PVC) ενάντια στην θερμότητα και το φως (2%), ως υλικά επιστρώσεων στον χάλυβα και σε μερικά άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα 7(%) και ως συστατικά διαφόρων εξειδικευμένων κραμάτων (1%).

Το ανθρακικό άλας και το χλωρίδιο του καδμίου χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν ως μηκυτοκτόνα με εφαρμογές σε διάφορους χορτοτάπητες, αλλά προς το τέλος της δεκαετίας του 80

απαγορεύτηκαν από την EPA (Environmental Protection Agency). Παρότι η χρήση του χλωριδίου του καδμίου ως εμπορικού προϊόντος παρουσιάζει μείωση, εξακολουθεί ακόμα να χρησιμοποιείται στην παρασκευή σουλφιδίων του καδμίου, στην κατασκευή ειδικών καθρεπτών καθώς και στην βαφή βαμβακερών υφασμάτων. Το σουλφίδιο του καδμίου λόγω των ιδιοτήτων φωτοαγωγιμότητας και ηλεκτροφωταύγειας χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων (solar cells) καθώς και ηλεκτρικών συσκευών [35].

Το κάδμιο χρησιμοποιείται επίσης και ως πρόσθετη ουσία σε ανόδους ψευδαργύρου για την προστασία δομών χάλυβα από διάβρωση (π.χ. σε σκάφη, σε λιμενικούς στύλους, σε παράκτιες εγκαταστάσεις και σωληνώσεις) .

Επιπτώσεις στην υγεία

Ο άνθρωπος προσλαμβάνει τις μεγαλύτερες ποσότητες καδμίου από την τροφή του (50μg/day περίπου)[33]. Το κάδμιο έχοντας την ιδιότητα του τοξικού μετάλλου και όντας εύκολα απορροφήσιμο από τα μανιτάρια, τα μαλάκια και τα μύδια, μπορεί να διοχετευτεί εύκολα στην τροφική αλυσίδα, να συσσωρευτεί στο συκώτι και στα νεφρά του ανθρώπου και κατά συνέπεια να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στην υγεία.

Η εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων καδμίου μπορεί να προκαλέσει νεφρικές και αναπνευστικές δυσλειτουργίες, ασθένειες που προσβάλλουν τον μυελό των οστών και προβλήματα στον θηροειδή αδένα. Η έντονη νεφρική δυσλειτουργία μπορεί να οδηγήσει στο σύνδρομο Fanconi, αποτέλεσμα του οποίου είναι η μειωμένη δυνατότητα πρόσληψης πρωτεϊνών, αμινοξέων, γλυκόζης, ασβεστίου και φωσφόρου. Το κάδμιο έχει ενοχοποιηθεί για

πρόκληση καρκίνου του προστάτη και των πνευμόνων ακόμα και για πρόκληση θανάτων (θανατηφόρα δόση καδμίου είναι πάνω από 350 mg).

Επανεπιλημμένη έκθεση σε υπερβολικά επίπεδα σκόνης ή καπνού μπορεί να βλάψει αμετάκλητα τους πνεύμονες, προκαλώντας δύσπνοια και εμφύσημα. Υψηλή έκθεση στον εισπνεόμενο καπνό του οξειδίου του καδμίου οδηγεί σε οξύ πνευμονικό οίδημα, και μπορεί να αποβεί θανατηφόρα. Υψηλή έκθεση σε απορροφούμενα διαλυτά άλατα καδμίου προκαλούν γαστρεντερίτιδα.

Η τοξική του δράση εκδηλώνεται με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι και η αντικατάσταση του ψευδαργύρου, ο οποίος είναι απαραίτητο ιχνοστοιχείο σε διάφορα βιολογικά συστήματα. Ο FAO/WHO συστήνουν μέγιστη ανεκτή κατανάλωση Cd τα 400-500 $\mu\text{g}/\text{week}$ [35].

Οι κατηγορίες πληθυσμού που εμφανίζουν αυξημένα ποσοστά κινδύνου από την έκθεσή τους σε κάδμιο περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

- Άτομα που πάσχουν από ασθένειες των νεφρών, στα οποία η επίδραση του καδμίου μπορεί να ενισχύσει την ήδη υπάρχουσα επιβαρημένη κατάσταση.
- Άτομα που λόγω γενετικών διαφοροποιήσεων εμφανίζουν διαφορές στην εισαγωγή μεταλλοθειονινών συναρτήσει της έκθεσής τους σε κάδμιο.
- Άτομα των οποίων οι διατροφικές συνήθειες έχουν ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή λήψη βασικών ιόντων μετάλλων και πρωτεϊνών. Στις περιπτώσεις αυτές προσρόφηση του καδμίου από το γαστρεντερικό σύστημα παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένη.

- ο Νεογνά ή μικρά παιδιά που εμφανίζουν υψηλά γαστρεντερικά ποσοστά προσρόφησης καδμίου.
- ο Καπνιστές .

Το κάδμιο προσροφάται ισχυρά στην οργανική ύλη των εδαφών. Όταν εμφανίζεται στα εδάφη μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνο, γιατί η πρόσληψή του μέσω της τροφής αυξάνεται. Αυτός είναι ενδεχόμενος κίνδυνος και για τα φυτοφάγα ζώα, τα οποία καταναλώνοντας φυτά για την επιβίωσή τους, συσσωρεύουν κάδμιο στο σώμα τους. Αποτέλεσμα της συσσώρευσης αυτού είναι βλάβες στα νεύρα και τον εγκέφαλο, όπως και βλάβες στο συκώτι.

Οργανισμοί του εδάφους (π.χ. σκουλήκια και άλλα ασπόνδυλα), είναι πολύ ευαίσθητοι ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις καδμίου. Ο θάνατός τους συνεπάγεται αλλαγή σε ολόκληρη την σύσταση του εδάφους. Όσον αφορά τα φυτά, αν και η έκταση των συμπτωμάτων του καδμίου σε αυτά εξαρτάται άμεσα από το είδος των φυτών, ο μαρασμός των φύλλων και η μειωμένη ανάπτυξη αποτελούν τα πιο συνήθη (βλ. Κεφάλαιο 1.5.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

4.1. Δομή και φυσιολογία της ρίζας

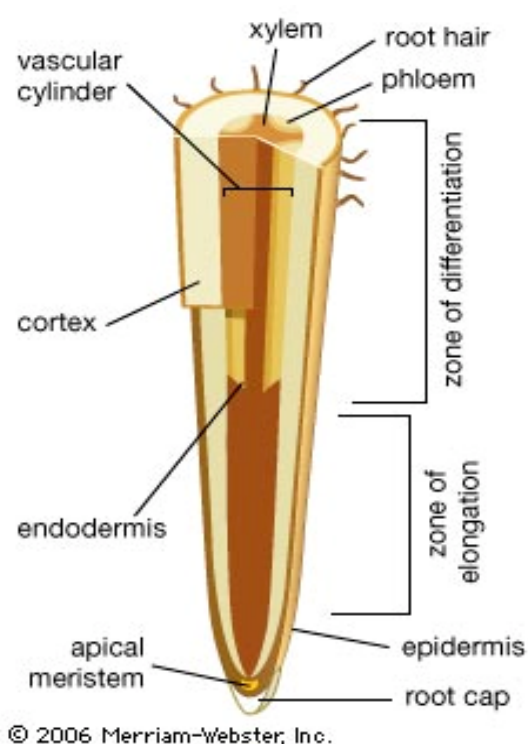
Το ριζικό σύστημα αποτελεί τα θεμέλια για την συγκράτηση του φυτού στο έδαφος και πάνω από όλα, αποτελεί το τμήμα του φυτού που φροντίζει για την πρόσληψη των μεγάλων ποσοτήτων νερού και θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την ανάπτυξή του, μέσω φυσικών και χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται μεταξύ αυτού και του εδάφους [37].

Η ανάπτυξη των φυτικών ριζών παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία μεταξύ των διαφόρων ειδών. Το μέγεθος και το σχήμα του υπέργειου τμήματος κάθε φυτού όπως και οι συνθήκες στις οποίες αναπτύσσεται καθορίζουν άμεσα το μέγεθος και το σχήμα του ριζικού συστήματος. Για παράδειγμα, φυτά που αναπτύσσονται σε καλά αρδευόμενα εδάφη, παρουσιάζουν μικρότερης έκτασης ριζικό σύστημα σε σχέση με φυτά που αναπτύσσονται υπό ξηρικές συνθήκες.

Στην άκρη κάθε αναπτυσσόμενης ρίζας υπάρχει ένα κωνικό κάλυμμα το οποίο καλείται καλύπτρα της ρίζας (Εικόνα 4.1). Η τελευταία, συνήθως δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι και θεωρείται ως η κατασκευή η οποία προστατεύει τα ευαίσθητα κύτταρα (κορυφαίο μερίστωμα) και διευκολύνει τη διείσδυση της ρίζας εντός του

εδάφους. Η απορρόφηση γίνεται μέσω της επιδερμίδας της ρίζας. Τα ριζικά τριχίδια (root hairs), αυξάνουν σημαντικά την ολική επιφάνειά της και αποτελούν προέκταση των επιδερμικών κυττάρων της ρίζας. Το μήκος κάθε ριζικού τριχιδίου κυμαίνεται από ένα χιλιοστό μέχρι ένα

εκατοστό και η διάμετρος του είναι περίπου 0,01 χιλιοστά [39]. Η διάρκεια ζωής τους περιορίζεται σε λίγες μόνο ημέρες, με αποτέλεσμα τα ριζικά τριχίδια να απουσιάζουν από τα παλαιότερα τμήματα της ρίζας. Τα ριζικά τριχίδια, παρέχουν επίσης μια μεγάλη περιοχή διαθέσιμη για απορρόφηση. Από τα ριζικά τριχίδια, το νερό διέρχεται μέσα από το περίβλημα του ξύλου, την ενδοδερμίδα, το περικύκλιο και το ξύλο.



Εικόνα 4.1. Τομή ρίζας φυτού. Διακρίνονται το ξύλο, ο ηθμός, η ενδοδερμίδα, το περικύκλιο και το ριζικό κάλυμμα [38].

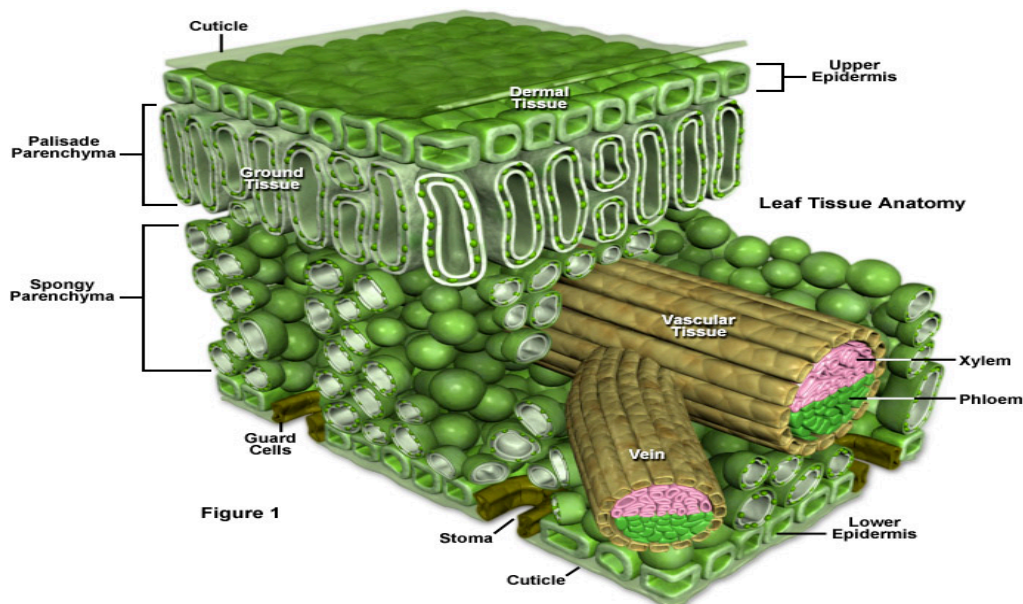
Η Ριζόσφαιρα, (Rhizosphere) ορίζεται ως η περιοχή γύρω από το ριζικό σύστημα του φυτού όπου παρατηρείται έντονη μικροβιακή δραστηριότητα. Στην περιοχή της Ριζόσφαιρας αναπτύσσονται βακτήρια, μύκητες και πρωτόζωα, τα οποία λαμβάνουν απαραίτητες για την ανάπτυξη τους οργανικές ουσίες, οι οποίες εκκρίνονται από τις ρίζες. Μερικοί μικροοργανισμοί με τη σειρά τους, συμβάλουν στην

υγιή κατάσταση των φυτών, τροποποιώντας το εδαφικό pH, προσθέτοντας χηλικούς παράγοντες και επεκτείνοντας την ενεργό ζώνη απορρόφησης των θρεπτικών ουσιών από τις φυτικές ρίζες [28].

4.2. Οι βλαστοί και τα φύλλα των φυτών

Οι βλαστοί των φυτών παρέχουν την υποστήριξη των φύλλων, των ανθέων και των καρπών των φυτών. Η διάταξη τους είναι τέτοια ώστε να βοηθά το φυτό στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας και στην ανταλλαγή των αερίων με την ατμόσφαιρα. Σε δέντρα με μεγάλο ύψος, η απόσταση μεταξύ των ριζών και των φύλλων ίσως να καθορίζει ποια χημική ουσία θα φτάσει στα φύλλα.

Τα φύλλα, εκτός από το να αποτελούν τα κύρια όργανα της φωτοσύνθεσης, επιτελούν σε μεγάλο βαθμό και μια άλλη ουσιαστική λειτουργία, τη διαπνοή, δηλαδή τον έλεγχο της οικονομίας νερού εντός του φυτικού σώματος. Τα φύλλα καλύπτονται από ένα υδρόφοβο, κηρώδες στρώμα γνωστό ως εφυμενίδα, το οποίο παρεμποδίζει την απώλεια ύδατος καθώς και την προσβολή από παθογόνους μικροοργανισμούς [40].



Εικόνα 4.2. Εγκάρσια τομή φύλλου φυτού. Διακρίνεται η άνω επιδερμίδα, η στρώση πασσαλώδους και σπογγώδους παρεγχύματος και η κάτω επιδερμίδα [41].

Η εσωτερική δομή των φύλλων ποικίλει μεταξύ των διαφόρων φυτικών ειδών ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται. Ο επιδερμικός ιστός των φύλλων αποτελείται από διάφορους τύπους κυττάρων όπως τα επιδερμικά κύτταρα, τα καταφρακτικά και παραφρακτικά κύτταρα των στοματίων και τέλος από διάφορα τριχώματα. Η επιδερμίδα βοηθά στην προστασία του φυτού ενάντια στην απώλεια νερού, στην ρύθμιση της ανταλλαγής αερίων, στην έκκριση μεταβολικών προϊόντων και σε ορισμένα είδη στην απορρόφηση νερού. Τα στομάτια είναι οι πόροι μέσω των οποίων ρυθμίζεται η εξάτμιση του νερού και η ανταλλαγή των αερίων. Στα περισσότερα φυτά τα στομάτια βρίσκονται στην κάτω επιφάνεια των φύλλων ενώ σε ορισμένα φυτά είναι δυνατόν να υπάρχουν και στις δύο πλευρές των φύλλων (αμφιστοματικά φυτά).

Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μεταξύ της πάνω και κάτω επιδερμίδας του φύλλου καλείται μεσόφυλλο και καλύπτεται από το παρέγχυμα ή αλλιώς χλωρέγχυμα. Όταν τα στομάτια είναι ανοικτά, τα αέρια μόρια διαχέονται από και προς την ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρούν με αυτό. Η περιοχή αυτή του φύλλου είναι υπεύθυνη για τη συσσώρευση CO_2 , την απώλεια O_2 και την εξάτμιση του νερού.

Στην εφυμενίδα των φύλλων υπάρχουν ορισμένες κατασκευές, γνωστές ως τριχίδια, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία. Τα τριχίδια μπορεί να είναι μονοκύτταρες ή πολυκύτταρες κατασκευές, αδενώδεις ή μη και γενικά αυξάνουν την επιφάνεια επαφής των φύλλων με το αέρα [39].

4.3. Η κίνηση του νερού και των διαλυμένων συστατικών στα φυτά

Η ικανότητα του φυτού να μεταφέρει τόσο οργανικά όσο και ανόργανα υλικά, συμπεριλαμβανομένου και του νερού, σε όλο το σώμα του, είναι καθοριστική για την ανάπτυξη και μορφή του φυτού και για την κατανόηση ολόκληρης της δομής και λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων του συνολικά.

Στις αρχές του 19ου αι. ένας Άγγλος φυσικός, ο Stephen Hales, παρατήρησε ότι τα φυτά απορροφούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού από τα ζώα. Ένα ζώο χρησιμοποιεί λιγότερο νερό, γιατί το περισσότερο από αυτό που καταναλώνει ανακυκλώνεται μέσα στο σώμα του συνεχώς, σε μορφή (στα σπονδυλωτά) αίματος ή άλλων υγρών. Στα φυτά, περισσότερο από το 90% του νερού που απορροφάται από τις ρίζες του, χάνεται σε μορφή υδρατμών. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαπνοή, η οποία ορίζεται ως η απώλεια νερού σε μορφή υδρατμών από οποιοδήποτε μέρος του φυτού, αν και τα φύλλα αποτελούν τα βασικά όργανα της διαπνοής.

Η αιτία των τεράστιων απωλειών νερού από τα φυτά, προκύπτει από την θεμελιώδη λειτουργία τους, τη φωτοσύνθεση (την πηγή τροφής δηλαδή για ολόκληρο το φυτό). Το φυτό, αντλεί την απαραίτητη ενέργεια για να φωτοσυνθέσει από την ηλιακή ακτινοβολία. Γι' αυτό, για να φωτοσυνθέσει όσο το δυνατόν περισσότερο, το φυτό πρέπει να εκθέσει στο φως όσο το δυνατόν περισσότερη επιφάνεια. Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία είναι μόνο ένας από τους παράγοντες που απαιτούνται για τη φωτοσύνθεση. Οι χλωροπλάστες χρειάζονται εκτός από οξυγόνο, να καταναλώσουν και διοξείδιο του άνθρακα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαθέσιμο στον αέρα

που περιβάλλει το φυτό. Για να εισέλθει όμως σε αυτό με τη διαδικασία της διάχυσης, πρέπει να είναι σε μορφή διαλυτή, επειδή η πλασματική μεμβράνη είναι σχεδόν αδιαπέρατη για το διοξείδιο του άνθρακα, όταν αυτό βρίσκεται σε αέρια μορφή. Έτσι, το αέριο πρέπει να έρθει σε επαφή με μια υγρή κυτταρική επιφάνεια. Ωστόσο, οποτεδήποτε το νερό έρχεται σε επαφή με τον αέρα, εξατμίζεται [37].

Τα φυτά, έχουν αναπτύξει πληθώρα ειδικών μηχανισμών προσαρμογής, ώστε να περιορίζουν την εξάτμιση. Ωστόσο, συγχρόνως περιορίζουν και την παροχή διοξειδίου του άνθρακα. Με άλλα λόγια, η πρόσληψη του απαραίτητου διοξειδίου του άνθρακα για φωτοσύνθεση και η απώλεια νερού λόγω διαπνοής είναι άρρηκτα συνδεδεμένες λειτουργίες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του φυτού.

Η κίνηση του νερού και των θρεπτικών στοιχείων από τη ρίζα μέχρι το αγγειακό σύστημα, αποτελεί ίσως το πιο πολύπλοκο κομμάτι της μεταφοράς τους στο εσωτερικό του φυτού [37]. Όταν το νερό εξατμίζεται κατά τη διάρκεια της διαπνοής από τα ανοιχτά στομάτια που εντοπίζονται στην επιφάνεια των φύλλων, στη συνέχεια ανακτάται από αυτό που βρίσκεται μέσα στο κύτταρο. Αυτή η ποσότητα νερού, διαχέεται διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης, η οποία είναι διαπερατή σε αυτό, αλλά όχι στα διαλυμένα συστατικά του κυττάρου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των διαλυμένων συστατικών μέσα στο κύτταρο και την μείωση του υδατικού δυναμικού σε αυτό. Τότε, δημιουργείται μια διαβάθμιση υδατικού δυναμικού μεταξύ αυτού του κυττάρου και των πιο κορεσμένων γειτονικών του. Αυτά τα κύτταρα, διαδοχικά, ανακτούν το νερό από άλλα γειτονικά κύτταρα και συνεπώς, εξαιτίας αυτής της διαδοχικής αλυσίδας γεγονότων προκύπτει η

κατακόρυφη κίνηση του νερού. Εξαιτίας αυτής της εξαιρετικής συνεκτικότητας των μορίων του νερού, αυτή η κίνηση μεταδίδεται κατά μήκος ολόκληρου του σώματος του φυτού, μέχρι και τις ρίζες, έτσι ώστε το νερό που απορροφάται από τις ρίζες, διασχίζει το ξύλο και έπειτα τροφοδοτεί τα κύτταρα που παρουσιάζουν απώλεια νερού, λόγω εξάτμισής του στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, αυτή η απώλεια κάνει ακόμα πιο αρνητικό το δυναμικό στις ρίζες αυξάνοντας την ικανότητα τους να απορροφήσουν νερό από το έδαφος.

Οι αγωγοί ιστοί μεταφοράς αποτελούν το σύστημα μέσω του οποίου εξασφαλίζεται η μεταφορά του νερού και των ανόργανων αλάτων που απορροφούνται από το έδαφος μέσω των ριζών. Συντελούν επίσης, στην κυκλοφορία εντός του φυτικού σώματος προς όλες τις κατευθύνσεις, των οργανικών υλικών που παράγονται μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι αγωγοί ιστοί συμβάλλουν αποφασιστικά στην επιβίωση όλων των χερσαίων φυτών διασφαλίζοντας την κανονική ενυδάτωση όλων των κυττάρων του φυτικού σώματος και βοηθούν στην αντικατάσταση των απωλειών σε υγρασία και διαφοροποιούνται στο ξύλο (xylem) και στον ηθμό (phloem).

Ο ιστός του ξύλου, κατασκευαστικά είναι αρκετά πολύπλοκος και αποτελείται από διάφορους τύπους νεκρών και ζωντανών κυττάρων. Οι θεμελιώδεις τύποι των αγωγών στοιχείων του ξύλου διακρίνονται στις τραχεΐδες και στα αγγεία του ξύλου, τα οποία στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή τους αποτελούνται από επιμήκη κύτταρα με λιγνινοποιημένα κυτταρικά τοιχώματα [40].

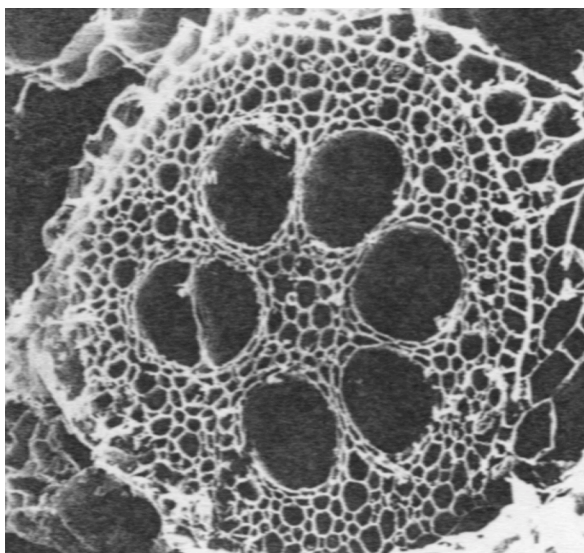
Στα αγγεία του ξύλου τα επιμέρους κύτταρα ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν συνεχείς σωλήνες, αφού πρώτα διαλυτοποιηθούν τα εγκάρσια τοιχώματά τους. Μέσα σε αυτές τις

κατασκευές, οι φυτικοί χυμοί κινούνται ελεύθερα από στοιχείο σε στοιχείο.

Στις τραχεΐδες τα εγκάρσια τοιχώματα των κυττάρων υπάρχουν αλλά σε αυτά βρίσκεται μεγάλος αριθμός ειδικών πόρων. Οι πόροι αυτοί είναι ονομάζονται βοθρία και μέσω αυτών κυκλοφορεί ο φυτικός χυμός από στοιχείο σε στοιχείο.

Ο ιστός του ηθμού, αποτελείται όπως και το ξύλο, από διάφορα είδη κυττάρων με διαφορετικές λειτουργίες το κάθε ένα. Τα βασικά στοιχεία του ηθμού είναι οι ηθμοσωλήνες (sieve elements), μέσω των οποίων πραγματοποιείται η κυκλοφορία των προϊόντων της φωτοσύνθεσης, τα συνοδά κύτταρα και οι σκληρεΐδες.

Από τη στιγμή που το νερό εισέλθει στα αγωγή μέρη του ξύλου, κινείται ανοδικά από τις ρίζες προς το υπέργειο τμήμα του φυτού. Στην ενδοδερμίδα, ωστόσο, το νερό αναγκάζεται να διεισδύσει τις πλασματικές μεμβράνες και τους πρωτοπλάστες των ενδοδερμικών κυττάρων εξαιτίας της παρουσίας της λωρίδας Caspari.



Εικόνα 4.3. Εγκάρσια τομή ρίζας του φυτού *Zea mays*. Διακρίνονται το ξύλο, ο ηθμός, η ενδοδερμίδα και το περικύκλιο. Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο [28].

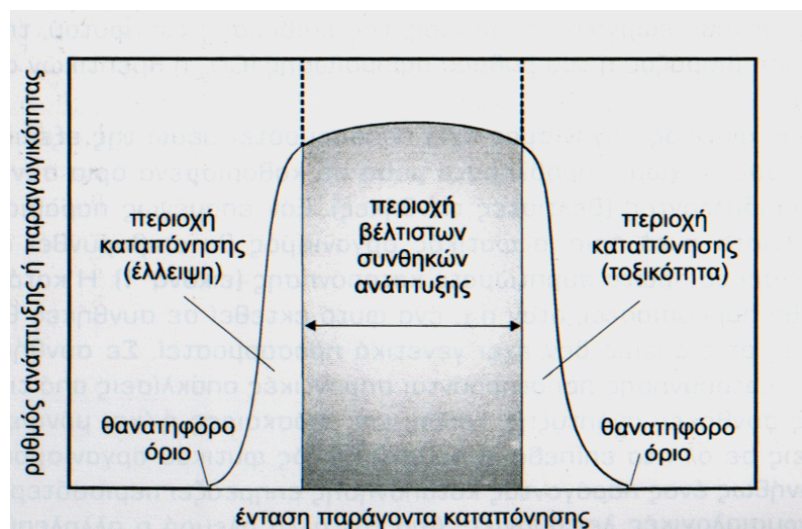
Κατά τις περιόδους έντονης διαπνοής, τα συσσωρευμένα στο ξύλο της ρίζας ιόντα, παρασύρονται εξαιτίας της διαπνοής, με αποτέλεσμα η κίνηση του νερού λόγω όσμωσης κατά μήκος της ενδοδερμίδας να μειώνεται. Σε τέτοιες περιόδους, οι ρίζες γίνονται παθητικά απορροφητικές επιφάνειες, μέσω των οποίων το νερό κινείται ωθούμενο από την διαπνοή που πραγματοποιείται στο υπέργειο τμήμα. Κάποιοι ερευνητές πιστεύουν ότι πρακτικά, όλη η απορρόφηση του νερού από τις ρίζες των φυτών που διαπνέουν συμβαίνει με αυτόν τον παθητικό τρόπο.

Η κατακόρυφη κίνηση του νερού εντός του φυτικού σώματος έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά διαλυμένων ουσιών αλλά και ρυπαντών. Η μοριακή διάχυση αποτελεί κυρίαρχη διαδικασία και εξαρτάται από το μοριακό βάρος της ουσίας, από τη θερμοκρασία και τη φύση του μέσου. Η κατακόρυφη κίνηση του νερού και των διαλυμένων ουσιών στους ιστούς γύρω από το ξύλο, πραγματοποιείται με διάχυση παρά το γεγονός ότι ο κύριος όγκος του νερού κινείται μέσω του ξύλου. Μεταφορά μέσω διάχυσης είναι δυνατή και από ξύλο στον ηθμό λόγω της μικρής απόστασης τους. Η συγκέντρωση όμως των ξενοβιοτικών ουσιών στον ηθμό δεν αναμένεται να ξεπεράσει αυτή του ξύλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

Κατά τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου τα φυτά εκτίθενται πολλές φορές σε αντίξοες συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν δυσμενώς τόσο την ανάπτυξη, όσο και την ίδια τους την επιβίωση. Ο όρος «καταπόνηση» αναφέρεται στην επίδραση δυσμενών παραγόντων του περιβάλλοντος, οι οποίοι τείνουν να παρεμποδίσουν την εύρυθμη λειτουργία φυσιολογικών μηχανισμών [42]. Επομένως, όταν ένας φυτικός οργανισμός παρουσιάζει αποκλίσεις από τα κανονικά επίπεδα λειτουργίας του, τότε πιθανώς οι δυσλειτουργίες αυτές οφείλονται σε παράγοντες καταπόνησης από το περιβάλλον του. Η καταπόνηση είθισται να εκτιμάται από την ανάπτυξη της βιομάζας του φυτού και την επιβίωσή του, το παραγόμενο γεωργικό προϊόν όπως και από τον ρυθμό αφομοίωσης CO_2 ή θρεπτικών συστατικών.



Εικόνα 5.1. Τα βέλτιστα όρια ανάπτυξης ενός φυτικού οργανισμού και η εμφάνιση συμπτωμάτων καταπόνησης όταν αυξάνεται ή ελαττώνεται πέραν ορισμένων ορίων η ένταση του παράγοντα καταπόνησης [42].

Ο ρυθμός ανάπτυξης και η παραγωγικότητα κάθε φυτικού οργανισμού όντας άμεσα εξαρτώμενοι παράγοντες από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον του, παρουσιάζουν βέλτιστες τιμές σε συγκεκριμένα όρια συνθηκών, στα οποία έχει προσαρμοστεί να αναπτύσσεται μέσω της εξέλιξης. Εάν παραβιαστούν τα βέλτιστα αυτά όρια, ο φυτικός οργανισμός θα επιβαρυνθεί και θα εμφανίσει τα πρώτα συμπτώματα καταπόνησης (βλ. Εικόνα 5.1).

Παράδειγμα της κατάστασης αυτής αποτελεί η έκθεση ενός φυτού σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στις οποίες δεν έχει γενετικά προσαρμοστεί. Σε συνθήκες έντονης καταπόνησης παρατηρούνται πρόσκαιρες ή ακόμη και μόνιμες επιδράσεις σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας ενός φυτικού οργανισμού. Η παρουσία παραγόντων καταπόνησης στο περιβάλλον ενός φυτικού οργανισμού δεν παρουσιάζει συνήθως ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο και στο χρόνο.

Οι πολυάριθμοι παράγοντες του περιβάλλοντος οι οποίοι μπορούν εν δυνάμει να προκαλέσουν καταπονήσεις στα φυτά, καταχωρούνται σε δύο κατηγορίες: στους αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες.

Στους κυριότερους μη ανθρωπογενούς προέλευσης αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης ανήκει:

Η υδατική καταπόνηση, η οποία εμφανίζεται είτε με τη μορφή της αφυδάτωσης (ως σύμπτωμα ξηρασίας), είτε με τη μορφή της ωσμωτικής καταπόνησης (ως σύμπτωμα της αλατότητας). Το κοινό χαρακτηριστικό και των δύο περιπτώσεων είναι η διαμόρφωση χαμηλού δυναμικού του νερού (και επομένως ελλείμματος νερού) στους φυτικούς ιστούς. Τα φυτά, ανάλογα με την στρατηγική

προσαρμογής τους στο εκάστοτε υδατικό περιβάλλον καταχωρούνται ως υδρόφυτα, υγρόφυτα, μεσόφυτα και ξηρόφυτα. Άμεσα εξαρτώμενο παράγοντα καταπόνησης με την υδατική καταπόνηση αποτελεί και η αλατότητα (βλ. Κεφάλαιο 5.2.).

Επιπλέον, η ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών περιορίζεται από ανώτερα και κατώτερα όρια θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, αφού τα φυτά αναπτύσσονται ικανοποιητικά σε μια συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών. Η επικράτηση παγετού επιφέρει φυσιολογικές βλάβες ανάλογες μιας έντονης έλλειψης νερού και αντίστοιχα οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην περατότητα και στις καταλυτικές ιδιότητες των μεμβρανών των φυτών. Η άνοδος της θερμοκρασίας επηρεάζει επίσης τις διεργασίες της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής.

Όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία την οποία εκπέμπει ο ήλιος αποτελεί την πηγή ενέργειας για τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Ωστόσο, κάτω από ορισμένες συνθήκες, η ακτινοβολία αυτή μπορεί να προκαλέσει και έναν σημαντικό παράγοντα καταπόνησης για τους φυτικούς οργανισμούς, είτε με τη μορφή της «φωτοπενίας» (π.χ. έντονη σκιά), είτε με τη μορφή της τοξικότητας (π.χ. υψηλή ένταση ορατής ή υπεριώδους ακτινοβολίας).

Σε καλώς αεριζόμενα εδάφη, οι ρίζες των φυτών τροφοδοτούνται με επαρκείς συγκεντρώσεις οξυγόνου ώστε η αερόβια αναπνοή να διεξάγεται χωρίς προβλήματα. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που οι αέριοι χώροι οι οποίοι επιτρέπουν τη διάχυση του οξυγόνου σε σημαντικό βάθος από την επιφάνεια πλημμυρίσουν από το νερό της βροχής ή συμβεί υπερβολική άρδευση νερού, τότε επέρχεται ανεπάρκεια ή ακόμη και πλήρης έλλειψη οξυγόνου. Αυτό έχει σαν

αποτέλεσμα δραματικό περιορισμό στην παραγωγή ATP, οξίνιση του κυτοπλάσματος (που αποτελεί σημαντική μεταβολική παρενέργεια), αύξησης της δραστηριότητας αναερόβιων οργανισμών που διαμορφώνουν αναγωγικό περιβάλλον και περιορίζουν τη διάθεση θρεπτικών συστατικών καθώς και αδυναμία των ριζών να ανταποκριθούν στις ανάγκες του υπέργειου τμήματος.

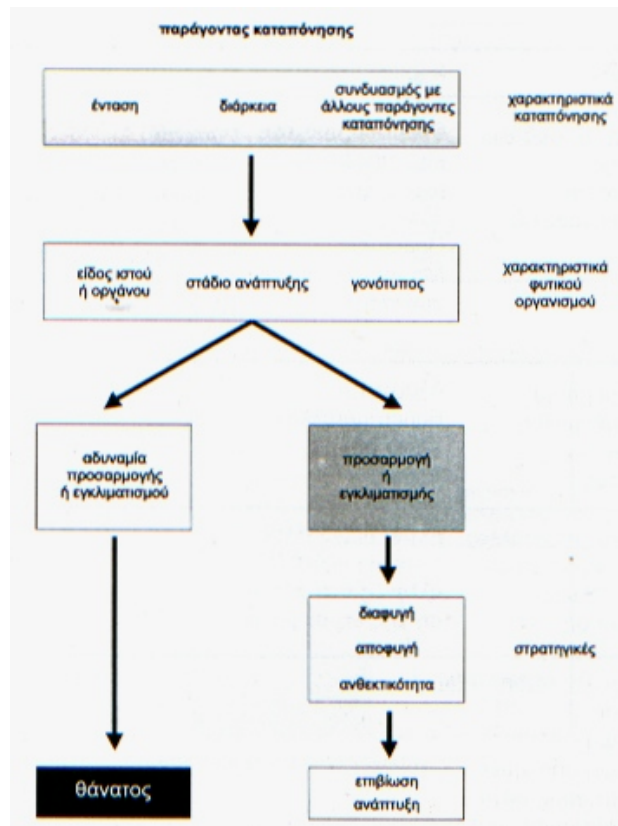
Τα φυτά στο φυσικό τους περιβάλλον εκτίθενται συνεχώς και σε μηχανικές καταπονήσεις. Ως μηχανική καταπόνηση μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε άσκηση δύναμης σε ιστούς, όργανα ή στο σώμα ενός φυτού, υπό την προϋπόθεση ότι αυτή δεν προκαλεί καταστροφή των δομών (π.χ. καταπόνηση από τον άνεμο, από τη βροχή ή από ασθενείς δονήσεις). Η εφαρμογή μηχανικής καταπόνησης επιφέρει χαρακτηριστικές τροποποιήσεις, βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες. Στις πρώτες περιλαμβάνεται η επιβράδυνση του ρυθμού ανάπτυξης και στις δεύτερες η πτώση της συνολικής φωτοσυνθετικής ικανότητας λόγω περιορισμού της φυλλικής επιφάνειας καθώς και η δυσχέρεια στη μεταφορά μέσω του ηθμού.

Στους ανθρωπογενούς προέλευσης αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης κατατάσσεται αρχικά οποιασδήποτε μορφής ρύπανση της βιόσφαιρας. Η παρουσία ορισμένων τουλάχιστον ρυπαντών σε αυτή ήταν ανέκαθεν συνδεδεμένη με γεωφυσικά συμβάντα του πλανήτη (π.χ. εκρήξεις ηφαιστείων), χωρίς όμως αυτά να αποτελούν σοβαρή πηγή κινδύνου για τους οργανισμούς. Ωστόσο, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, κυρίως των τελευταίων ετών, σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή έκρηξη, ανέδειξαν τους ρυπαντές ως ένα σοβαρό παράγοντα καταπόνησης των φυτικών οργανισμών. Η παρουσία και κατά συνέπεια η είσοδος βαρέων μετάλλων στο κύτταρο προκαλεί σοβαρές μεταβολικές παρενέργειες και επηρεάζει

την ανάπτυξη αλλά και την επιβίωση των φυτικών οργανισμών (βλ. Κεφάλαιο 5.1.). Σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις που επιφέρει η ατμοσφαιρική ρύπανση σε αυτούς. Οι αέριοι ρυπαντές, όπως το SO_2 , το NO_x και το O_3 εισέρχονται στα φύλλα ακολουθώντας την οδό διάχυσης που ακολουθεί και το CO_2 .

Οι φυτικοί οργανισμοί, εκτός από την δράση όλων των προαναφερθέντων αβιοτικών παραγόντων, καλούνται να αντιμετωπίσουν και μια πληθώρα βιοτικών. Βακτήρια, ιοί, μύκητες, ακάρεα, έντομα και φυτοφάγα ζώα, συγκροτούν ένα μακρύ κατάλογο απειλητικών για την επιβίωση εχθρών. Δεδομένου ότι τα φυτά αδυνατούν να αντεπεξέλθουν τις αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος με τη φυγή, αναγκάστηκαν μέσω της εξέλιξης να εφοδιαστούν με ένα τεράστιο βιοχημικό οπλοστάσιο δευτερογενών μεταβολιτών, οι οποίοι θωρακίζουν τα φυτικά κύτταρα έναντι των επίδοξων εχθρών.

Τα φυτά προσπαθώντας να επιβιώσουν σε συνθήκες του περιβάλλοντος που τους προκαλούν καταπόνηση, αντιδρούν αναπτύσσοντας κατάλληλους μηχανισμούς (βλ. Εικόνα 5.2). Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τροποποιήσεις στα μορφολογικά ή φυσιολογικά τους χαρακτηριστικά, αναγκαίες για να αντεπεξέλθουν στην καταπόνηση. Τα φυτά μη έχοντας τη δυνατότητα να αντεπεξέλθουν στις αντίξοες συνθήκες μέσω της φυγής, όπως συμβαίνει με τα ζώα, έχουν αναπτύξει μια ποικιλία στρατηγικών αντιμετώπισης των καταπονήσεων. Με τον όρο στρατηγική περιγράφεται μια ακολουθία μηχανισμών οι οποίοι καθορίζονται γενετικά και δίδουν τη δυνατότητα σε έναν φυτικό οργανισμό να επιβιώνει σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον [42].



Εικόνα 5.2. Παράγοντες και μηχανισμοί που διαμορφώνουν την ικανότητα ή μη να αντιμετωπιστεί ένας παράγοντας καταπόνησης από έναν φυτικό οργανισμό.

Οι στρατηγικές που ακολουθούν τα φυτά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Διαφυγή.** Τα φυτά τα οποία έχουν επιλέξει τη στρατηγική αυτή (stress escapers) αποτελούν ετήσιες μορφές ζωής που ολοκληρώνουν το βιολογικό τους κύκλο μέσα στην ευνοϊκή περίοδο κατά την οποία ο παράγων καταπόνησης δεν υφίσταται (π.χ. θερόφυτα τα οποία στην διάρκεια της χειμερινής περιόδου ψύχους δεν διατηρούν το υπέργειο τμήμα τους, αλλά απαντώνται σε ληθαργικές μορφές π.χ. με την μορφή σπερμάτων ή κονδύλων).

- **Αποφυγή.** Παρουσία του ή των παραγόντων καταπόνησης τα φυτά διαθέτουν μηχανισμούς οι οποίοι αμβλύνουν τις επιπτώσεις της καταπόνησης ακόμη κι όταν ο παράγοντας της καταπόνησης συνεχίζει να υφίσταται. π.χ. τα φυτά τα οποία αντιπαρέχονται την ξηρασία αναπτύσσοντας ριζικό σύστημα το οποίο εισχωρεί σε μεγάλα βάθη προσεγγίζοντας τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα κύτταρα ωστόσο των φυτών αυτών είναι εξαιρετικά ευαίσθητα έναντι της αφυδάτωσης.
- **Ανθεκτικότητα.** Παρουσία του ή των παραγόντων καταπόνησης τα φυτά διατηρούν υψηλή μεταβολική δραστηριότητα, συγκρίσιμη με εκείνη η οποία παρατηρείται στις βέλτιστες συνθήκες. Επιπροσθέτως οι συνθήκες οι οποίες επικρατούν στο εσωτερικό του οργανισμού είναι παρόμοιες με εκείνες οι οποίες επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον. Το φυτό δηλαδή δημιουργεί θερμοδυναμική ισορροπία με τις συνθήκες που προκαλεί ο εκάστοτε παράγοντας καταπόνησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αποκαλούμενα resurrection plants που αριθμούν σε πάνω από 100 είδη. Ενώ το υπέργειο τμήμα των περισσότερων φυτών δεν αντέχει σε διαφορετικές συνθήκες ενυδάτωσης από αυτές στις οποίες αναπτύσσεται κανονικά, το φύλλωμα των φυτών αυτών αναπτύσσεται κανονικά σε συνθήκες ενυδάτωσης λιγότερο από 7% χωρίς καμία βλάβη [37].

Η επιλογή οποιασδήποτε στρατηγικής από το κάθε φυτό επιβάλλει και τις κατάλληλες τροποποιήσεις στη δομή και λειτουργία των φυτών ενώ σε πολλές περιπτώσεις αλληλεπιδρούν περισσότεροι

του ενός παράγοντες καταπόνησης. Εάν οι τροποποιήσεις καθορίζονται γενετικά και εμφανίζονται μέσω της διαδικασίας της επιλογής για ένα διάστημα αρκετών γενεών, περιγράφονται με τον όρο προσαρμογή. Η προσαρμογή προσδίδει ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα στο συγκεκριμένο είδος όταν στο περιβάλλον επικρατεί ένας ή περισσότεροι παράγοντες καταπόνησης.

Ο εγκλιματισμός αναφέρεται σε επίκτητες τροποποιήσεις μορφολογικών ή/ και φυσιολογικών χαρακτηριστικών οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου ενός φυτικού οργανισμού, ως απάντηση στην ύπαρξη ενός ή περισσοτέρων παραγόντων καταπόνησης. Στην περίπτωση αυτή οι τροποποιήσεις συνήθως επάγονται κατά τη διάρκεια βαθμιαίας έκθεσης στις αντίξοες συνθήκες, και έχουν ως αποτέλεσμα την αντιμετώπιση της καταπόνησης. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η ικανότητα εγκλιματισμού αποτελεί γενετικά καθοριζόμενο χαρακτηριστικό, ωστόσο οι επαγόμενες τροποποιήσεις δεν μεταβιβάζονται ως χαρακτήρας στην επόμενη γενεά. Κατά την διάρκεια του εγκλιματισμού παρατηρούνται μεταβολικές τροποποιήσεις ώστε η ομοιόσταση σε κυτταρικό επίπεδο να ανταποκρίνεται στις νέες συνθήκες.

Ανεξάρτητα από το είδος του παράγοντα που προκαλεί μία καταπόνηση, η φυσιολογική διαδικασία που έχει ως τελικό αποτέλεσμα την αντιμετώπιση των δυσμενών συνθηκών ακολουθεί συνήθως μια ορισμένη σειρά γεγονότων. Τα φυτά αντιλαμβάνονται τα εξωτερικά ερεθίσματα (π.χ. ελάττωση του δυναμικού του νερού, ακραίες τιμές θερμοκρασίας) μέσω εξειδικευμένων δεκτών ή αισθητηρίων. Ο δέκτης μεταβάλλει ορισμένες ιδιότητές του, σηματοδοτώντας την έναρξη μιας ακολουθίας διαδικασιών εγκλιματισμού(εμφάνιση απάντησης) (βλ. Εικόνα 5.3) Επομένως το

στάδιο της αντίληψης περιλαμβάνει τις μεταβολές στις ιδιότητες του δέκτη που τις προκαλεί ένα συγκεκριμένο εξωτερικό ερέθισμα. Το στάδιο της μεταγωγής αφορά σε όλα τα γεγονότα τα οποία μεσολαβούν από την αντίληψη του ερεθίσματος έως την εμφάνιση της απάντησης. Κατά το στάδιο της μεταγωγής παρατηρούνται τα εξής:

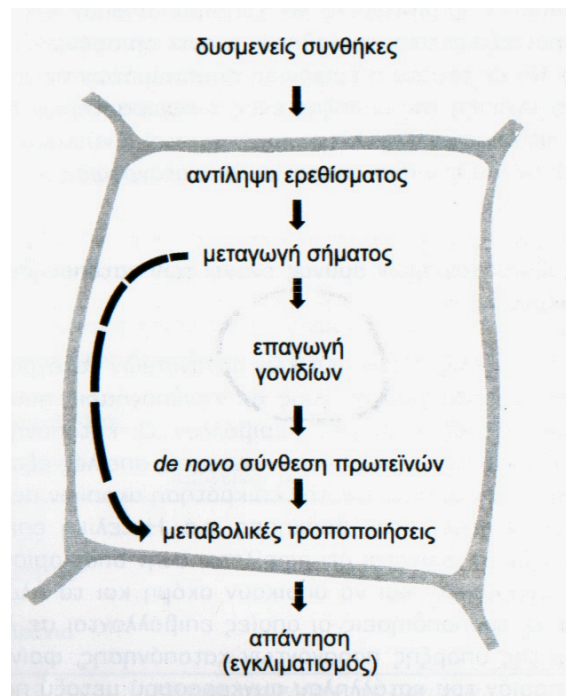
α. Ο δέκτης επάγει ελεγχόμενες μεταβολικές αλλαγές.

β. Διαβιβάζονται μηνύματα από την περιοχή του δέκτη σε μια ορισμένη περιοχή απάντησης. Η διαβίβαση μπορεί να συμβεί μεταξύ διαφορετικών κυττάρων ή μεταξύ διαφορετικών περιοχών του ίδιου κυττάρου. Συνήθως το στάδιο της μεταγωγής περιλαμβάνει μεταβολές στην έκφραση γονιδίων που έχουν σαν αποτέλεσμα τη σύνθεση νέων οικογενειών πρωτεϊνών. Οι πρωτεΐνες αυτές ονομάζονται πρωτεΐνες καταπόνησης (π.χ. θερμοϋπαγόμενες πρωτεΐνες). Επίσης παρατηρούνται εκτεταμένες μεταβολικές τροποποιήσεις είτε λόγω της σύνθεσης των πρωτεϊνών καταπόνησης, είτε λόγω τροποποίησης της δραστηριότητας υπάρχοντων ενζυμικών μορίων.

γ. Κατά κανόνα η απάντηση εξαρτάται από το μέγεθος της δόσης της έντασης του ερεθίσματος).

Για την διάγνωση των επιπτώσεων ενός παράγοντα καταπόνησης σε ένα φυτικό οργανισμό, συνήθως διερευνάται η κατάσταση στην οποία βρίσκονται, είτε ορισμένοι εξειδικευμένοι «στόχοι» οι οποίοι επιβαρύνονται ειδικά από τον συγκεκριμένο παράγοντα (π.χ.), είτε μη εξειδικευμένοι «στόχοι», των οποίων η κατάσταση καταγράφει μια γενικότερη διαταραχή των φυσιολογικών μηχανισμών. Στην τελευταία περίπτωση, χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η

ενεργοποίηση ορισμένων βιοσυνθετικών οδών του δευτερογενούς μεταβολισμού καθώς και των αντιοξειδωτικών συστημάτων των ιστών. Ορισμένα φυτικά είδη, μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν ως βιοδείκτες, δηλαδή οργανισμοί εξαιρετικά ευαίσθητοι έναντι ορισμένων παραγόντων καταπόνησης. Ως εκ τούτου η εμφάνιση συμπτωμάτων σε φυτά-βιοδείκτες αποτελεί ένδειξη της ύπαρξης ενός ή περισσότερων παραγόντων καταπόνησης στο περιβάλλον.



Εικόνα 5.3. Τα στάδια που μεσολαβούν από την έκθεση ενός φυτού σε δυσμενείς συνθήκες έως την εκδήλωση των μηχανισμών εγκλιματισμού σε κυτταρικό επίπεδο [42].

Οι φυτικοί οργανισμοί κατά την εξέλιξή τους χαρακτηρίζονται από μια συνεχή προσπάθεια προσαρμογής τους σε καταπονήσεις που ασκούνται από το αβιοτικό και το βιοτικό περιβάλλον. Η τελική επιβίωση τους φαίνεται ότι οφείλεται στην συνεχή ευελιξία και στην προσαρμοστικότητά τους ακόμα και στις πλέον αντίξοες

συνθήκες. Οι φυτικοί οργανισμοί προσπαθώντας να όχι μόνο να επιβιώσουν αλλά να διατηρήσουν τα επίπεδα παραγωγικότητάς τους στα καλύτερα δυνατά επίπεδα, υπόκεινται σε τροποποιήσεις των λειτουργιών τους και κυρίως σε μεταβολικές τροποποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν ένα ορισμένο ενεργειακό κόστος, συνήθως υψηλό. Παράδειγμα αποτελούν οι μεταβολικές τροποποιήσεις που έχουν ως στόχο την επίτευξη κυτταρικής ομοιόστασης ώστε να αντιμετωπιστούν οι κάθε είδους αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως π.χ. η σύνθεση συμβατών οσμωλυτών με σκοπό την οσμωρύθμιση του πρωτοπλάστη. Για παράδειγμα προκειμένου να αντιμετωπίσουν βιοτικούς παράγοντες καταπόνησης, οι φυτικοί οργανισμοί θωρακίζουν τους ιστούς τους είτε παρεμβάλλοντας φυσικά αμυντικά φράγματα, είτε συνθέτοντας ενώσεις του δευτερογενούς μεταβολισμού- τοξικές και αποτρεπτικές προς τους εχθρούς τους. Τόσο η κατασκευή αμυντικών δομών, όσο και η σύνθεση κάθε επιμέρους δευτερογενούς μεταβολίτη ο οποίος συμμετέχει σε αμυντικούς μηχανισμούς παρουσιάζουν ένα ορισμένο ενεργειακό κόστος, συνήθως υψηλό. Επομένως, η συσσώρευση σε υψηλές συγκεντρώσεις τέτοιου είδους συστατικών έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσοστό φωτοσυνθετικού προϊόντος (σε ορισμένα φυτά το ποσοστό αυτό ξεπερνά το 10 % της ξηρής τους μάζας), να επενδύεται στην άμυνα. Η συγκεκριμένη κατανομή πόρων θεωρείται απολύτως αναγκαία, εφόσον συμβάλει στην αποτελεσματικότερη προσαρμογή του οργανισμού. Κατά συνέπεια η τρέχουσα επένδυση στην άμυνα ενός φυτικού οργανισμού εκφράζει την ισορροπία που έχει τελικά επιτευχθεί μεταξύ δυο φαινομενικά ασυμβίβαστων αναγκών. Της ανάγκης να αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς, ώστε να αντιμετωπίζει επιτυχώς τους ανταγωνιστές και της ανάγκης να

διατηρεί αμυντικούς μηχανισμούς οι οποίοι του επιτρέπουν να επιβιώνει όταν έρχεται αντιμέτωπο με παθογόνους και φυτοφάγους οργανισμούς.

Ανάλογο ενεργειακό κόστος παρουσιάζουν και οι μεταβολικές τροποποιήσεις που έχουν ως στόχο την επίτευξη κυτταρικής ομοιόστασης ώστε να αντιμετωπιστούν οι κάθε είδους αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως π.χ. η σύνθεση συμβατών οσμωλυτών με σκοπό την οσμωρύθμιση του πρωτοπλάστη. Για τη σύνθεση ενός συμβατού οσμωλύτη του τύπου της πολυυδροξυαλκοόλης απαιτείται η κατανάλωση 54 mole ATP ανά mole σακχάρου. Η συσσώρευση ενός τέτοιου είδους μορίου σε συγκέντρωση 300 mM αντιπροσωπεύει το 20-30% του ξηρού βάρους του ιστού.

5.1. Καταπόνηση από βαρέα μέταλλα

Οι φυτικοί οργανισμοί, για την ομαλή τους αύξηση και ανάπτυξη χρειάζονται έναν σχετικά περιορισμένο αριθμό θρεπτικών στοιχείων, τα οποία αντλούν κυρίως από το έδαφος. Ωστόσο, το έδαφος, λόγω της υποβάθμισης που έχει υποστεί τα τελευταία χρόνια, περιέχει κι ένα πλήθος μη απαραίτητων στοιχείων, τα οποία παρά την υψηλή εκλεκτικότητα της περατότητας των μεμβρανών των φυτικών κυττάρων, είναι δυνατό να παρεισφρήσουν σε ίχνη μέσα στους φυτικούς ιστούς. Πολλά από τα στοιχεία αυτά, κυρίως βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο μπορεί να είναι εξαιρετικά τοξικά (βλ. Κεφάλαιο 3).

Παρόλα αυτά, όπως και σε άλλες περιπτώσεις καταπονήσεων, οι φυτικοί οργανισμοί παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ευαισθησίας έναντι των τοξικών επιδράσεων των βαρέων μετάλλων. Από τη μια μεριά, φυτά ονομαζόμενα ως βιοδείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη βαρέων μετάλλων στο έδαφος και από την άλλη, φυτά αποκαλούμενα ως υπερσυσσωρευτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απορρύπανση του εδάφους με την μέθοδο της φυτοεξυγίανσης.

Τα συμπτώματα των βαρέων μετάλλων, όταν αυτά εντοπίζονται στο περιβάλλον σε τοξικά επίπεδα, έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των ευαίσθητων ειδών, η οποία αποτελεί το πλέον ορατό αποτέλεσμα μιας σειράς επιπτώσεων στις μεταβολικές λειτουργίες. Τα συμπτώματα παρουσιάζονται σε μικρό χρονικό διάστημα αφού το φυτό εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και περιλαμβάνουν:

- Δυσλειτουργίες στην είσοδο και έξοδο ιόντων όπως Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- και K^+ μέσω των μεμβρανών.
- Παρεμπόδιση της λειτουργίας της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων τόσο στην αναπνοή, όσο και στη φωτοσύνθεση.
- Μη αντιστρεπτή παρεμπόδιση της δραστηριότητας ενζύμων κλειδιών. Η αποδραστηριοποίηση των ενζυμικών μορίων οφείλεται στη δέσμευση των ιόντων των βαρέων μετάλλων κυρίως σε θέσεις οι οποίες διαθέτουν σουλφυδρυλομάδες (-SH).
- *Ομάδα: αμινο (-NH₂), ιμινο (-NH-), σουλφυδρύλο (-SH).
- Σημαντική πτώση της παραγωγής ενέργειας [42].

Στρατηγικές αντιμετώπισης

Οι αρνητικές επιπτώσεις τις οποίες δημιουργεί η υψηλή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο εδαφικό περιβάλλον αντιμετωπίζονται κυρίως μέσω δύο στρατηγικών:

Αποφυγή

Τα φυτά τα οποία έχουν επιλέξει τη στρατηγική αυτή διαθέτουν κατάλληλους αμυντικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων αποκλείουν τα βαρέα μέταλλα στο εξωτερικό περιβάλλον. Τα κύτταρα των φυτών αυτών δεν έχουν την εμπειρία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στον συμπλάστη και παρουσιάζονται το ίδιο ευάλωτα με εκείνα των ευαίσθητων φυτών. Τα τοξικά μεταλλικά ιόντα είτε δεσμεύονται και εξουδετερώνονται στο περιβάλλον της Ριζόσφαιρας από χηλικές ενώσεις (κυρίως οργανικά οξέα, όπως μηλικό) οι οποίες απεκκρίνονται από τα

κύτταρα της ρίζας, είτε αποκλείονται στο εξωτερικό περιβάλλον λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας που παρουσιάζουν οι μεμβράνες των κυττάρων της ρίζας (κυρίως στις καρβοξυλικές ομάδες των συστατικών της πηκτίνης), πριν αυτά εισέλθουν στο ευαίσθητο κυτόπλασμα.

Ανθεκτικότητα

Οι φυτικοί οργανισμοί της κατηγορίας αυτής προσλαμβάνουν τα τοξικά μέταλλα από το περιβάλλον και έχουν την ικανότητα να τα συσσωρεύουν στους ιστούς τους σε εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις, οι οποίες προκαλούν τον κυτταρικό θάνατο στα ευαίσθητα είδη. Η λειτουργία των μηχανισμών ανθεκτικότητας καθορίζεται γενετικά, ωστόσο μπορεί να διαφοροποιηθεί μέσω εγκλιματισμού. Τα φυτά αυτά χαρακτηρίζονται ως συσσωρευτές μετάλλων ή μεταλλόφυτα ή υπερσυσσωρευτές, με χαρακτηριστικούς εκπροσώπους είδη του γένους *Astragalus*, *Silene*, *Agrostis*, *Minuartia* (βλ. Κεφάλαιο 2).

Οι μηχανισμοί ανθεκτικότητας των φυτών στα βαρέα μέταλλα, που έχουν προσδιοριστεί μέχρι σήμερα, είναι:

1. Ο έλεγχος στο επίπεδο της πλασματικής μεμβράνης.
2. Η διαδικασία της χήλωσης και
3. Η διαμερισματοποίηση στο χυμοτόπιο.

1. Ένα αντιπροσωπευτικό φυτικό κύτταρο περιβάλλεται από την πλασματική μεμβράνη, η οποία είναι εκλεκτικά διαπερατή, επιτρέπει δηλαδή την είσοδο μόνο σε συγκεκριμένα υλικά [37]. Η

πλασματική μεμβράνη των φυτών αποτελεί την πρώτη ενεργή δομή η οποία είναι στόχος της τοξικότητας των βαρέων μετάλλων. Η λειτουργία της πλασματικής μεμβράνης επηρεάζεται ταχύτατα από τα βαρέα μέταλλα. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων προκαλεί αυξημένη διαρροή αυτών από τα κύτταρα, ιδιαιτέρως του Cu.

Ο μηχανισμός της ανθεκτικότητας των φυτών μπορεί να περιλαμβάνει αφενός την προστασία της ακεραιότητας της πλασματικής μεμβράνης από την ζημιά των βαρέων μετάλλων και αφετέρου η διατήρηση της ομοιόστασης μέσω της εκροής περιττών για το κύτταρο στοιχείων.

Παρουσία αυξημένων συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, το κύτταρο τείνει να επιδιορθώσει τη δομή των μεμβρανών από την βλάβη που υπέστησαν λόγω της αύξησης αυτής, ενεργοποιώντας συγκεκριμένες πρωτεΐνες (π.χ. μεταλλοθειονίνες) που έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν τα μέταλλα και αναλύονται εκτενώς παρακάτω. Ένας άλλος μηχανισμός της μεμβράνης σχετίζεται με τη διατήρηση της ομοιόστασης των μετάλλων, είτε εμποδίζοντας ή μειώνοντας την είσοδό τους στο κύτταρο ή μέσω μηχανισμών εκροής. Λόγω του ότι αρκετά από αυτά τα κατιόντα είναι απαραίτητα, ο πλήρης αποκλεισμός τους δεν είναι δυνατός. Η επιλεκτική εκροή θεωρείται περισσότερο ρεαλιστική. Φαίνεται δηλαδή ότι το κύτταρο προτιμά την ενεργοποίηση συστημάτων εκροής παρά την ενεργοποίηση εξειδικευμένων μηχανισμών πρόσληψης που έχουν σαν στόχο να περιορίζουν την είσοδο των τοξικών ιόντων.

2. Χήλωση είναι η αντίδραση δημιουργίας συμπλόκου ενός μετάλλου με οργανική ουσία (χηλική ένωση). Η χημική ενεργότητα και η περιορισμένη διαλυτότητα των περισσότερων μεταλλικών ιόντων, απαιτεί σταθερή χήλωση από τη στιγμή που θα βρεθούν μέσα στο κύτταρο. Χηλικές ενώσεις δεσμεύουν τα μεταλλικά ιόντα ενδοκυτταρικά, συνεισφέροντας στη αποτοξίνωση του κυττάρου και ρυθμίζοντας τη συγκέντρωση των μετάλλων στο κυτταρόπλασμα. Στα φυτά οι κυριότερες κατηγορίες των χηλικών ενώσεων των μετάλλων περιλαμβάνουν οργανικά οξέα και αμινοξέα, καθώς και πρωτεϊνικής φύσης μόρια (τις φυτοχηλατίνες και τις μεταλλοθειονίνες) [43].

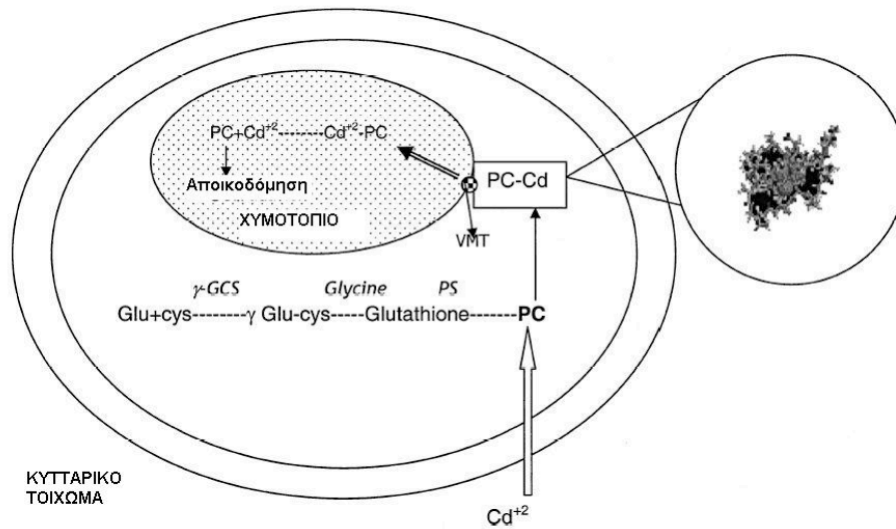
Οι φυτοχηλατίνες είναι μια ομάδα πρωτεϊνών οι οποίες επάγονται στα φυτά όταν αυτά έλθουν αντιμέτωπα με καταπόνηση από βαρέα μέταλλα. Δρουν δεσμεύοντας τα ελεύθερα μεταλλικά ιόντα στο μόριό τους και τα μεταφέρουν στο χυμοτόπιο όπου δεν είναι πλέον τοξικά και απ' όπου τελικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το φυτό για την ανάπτυξη του, αν το μέταλλο αυτό είναι απαραίτητο στοιχείο, όπως ο Cu και ο Zn [44].

Εκτός της αποτοξίνωσης οι φυτοχηλατίνες παίζουν σημαντικό ρόλο και στην ομοίωση των βαρέων μετάλλων στα φυτά, ρυθμίζοντας τη διαθεσιμότητά τους. Τα μεταλλικά ιόντα όπως ο Cu και ο Zn πρέπει να εισέλθουν στα κύτταρα για να γίνουν μέρος των καταλυτικών πρωτεϊνών. Οι φυτοχηλατίνες επομένως έχουν διπλό ρόλο. Από τη μία μεριά, πρέπει να συγκρατήσουν τα μεταλλικά ιόντα πολύ σφικτά να τα αδρανοποιήσουν και να τα αποθηκεύσουν στο χυμοτόπιο. Από την άλλη μεριά, πρέπει να μεταφέρουν τα απαραίτητα μέταλλα σε καινούργια συντιθέμενα από ένζυμα που απαιτούν Cu ή Zn [45].

Οι μεταλλοθειονίνες είναι πρωτεΐνες παρόμοιες με τις φυτοχηλατίνες, αφού και οι δύο είναι απαραίτητες για την αποτοξίνωση των βαρέων μετάλλων. Όλες οι μεταλλοθειονίνες έχουν τρία κοινά χαρακτηριστικά: α) χαμηλό μοριακό βάρος β) ένα μεγάλο ποσοστό υπολειμμάτων κυστεΐνης και γ) υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα που βρίσκονται δεσμευμένα από τις σουλφυδρυλικές ομάδες των κυστεϊνών.

3. Η εκροή των μεταλλικών ιόντων στην πλασματική μεμβράνη ή η μεταφορά τους στο χυμοτόπιο είναι δύο τρόποι για να μειώσουν τα ενδογενή επίπεδα των τοξικών μετάλλων στο κυτταρόπλασμα και έτσι είναι σημαντικοί μηχανισμοί για την ανθεκτικότητα στα βαρέα μέταλλα. Ένα καλά τεκμηριωμένο παράδειγμα είναι η συσσώρευση Cd και φυτοχηλατινών στο χυμοτόπιο που πραγματοποιείται από ειδικές πρωτεΐνες μεταφορείς με την κατανάλωση ενέργειας [46].

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι το χυμοτόπιο είναι η θέση για τη συσσώρευση και άλλων βαρέων μετάλλων, συμπεριλαμβανομένου του Zn και του Ni. Για παράδειγμα, μετά από επέμβαση με Zn σε μεριστωματικά κύτταρα της ρίζας του *Festuca rubra* παρατηρήθηκε αύξηση του σχηματισμού χυμοτοπίων ενώ μελέτες πρόσληψης με τη χρήση ραδιενεργού Zn σε φύλλα κριθαριού έδειξαν ότι η ταχεία διαμερισματοποίηση του Zn ήταν ένας σημαντικός μηχανισμός για την αντιμετώπιση των υψηλών εξωγενών επιπέδων του μετάλλου. Άλλες μελέτες σε φύλλα κριθαριού έδειξαν ότι αν και το Cd, ο Zn και το Mo βρέθηκαν κυρίως μέσα στο χυμοτόπιο, το Ni βρέθηκε κυρίως στο κυτταρόπλασμα.



Εικόνα 5.4. Το κάδμιο ενεργοποιεί την Συνθάση της φυτοχηλατίνης η οποία μετατρέπει τη γλουταθειόνη σε φυτοχηλατίνη. Στη συνέχεια τα μόρια των φυτοχηλατινών σχηματίζουν σύμπλοκα με τα ιόντα του καδμίου δεσμεύοντάς τα και τα οδηγούν στο χυμοτόπιο [17].

5.2. Καταπόνηση από Αλατότητα

Ο όρος αλατότητα αναφέρεται στην ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων (κατά κανόνα Na^+ και Cl^-), κυρίως στο περιβάλλον της ρίζας. Παρόλο που στην περίπτωση αυτή το νερό στην περιοχή της Ριζόσφαιρας βρίσκεται συνήθως σε αφθονία, η υψηλή συγκέντρωση ιόντων στο εδαφικό διάλυμα έχει ως αποτέλεσμα το νερό αυτό να μην είναι διαθέσιμο, λόγω του χαμηλού υδατικού δυναμικού. Η αλατότητα ως παράγοντας καταπόνησης, παρουσιάζεται σε εκτεταμένες περιοχές του πλανήτη (η έκτασή τους φτάνει το 20% του συνόλου των καλλιεργούμενων εδαφών) οι οποίες για διάφορους λόγους εμφανίζουν υψηλή αλατότητα στο έδαφος.

Σε αυτές της περιοχές ανήκουν όσες διαβρέχονται από θαλασσινό νερό (αλίπεδα ή υφάλμυρα έλη). Τα εδάφη τους δεν παρουσιάζουν ομοιόμορφη σύσταση και συγκέντρωση από πλευράς ιόντων. Οι δύο αυτές παράμετροι εξαρτώνται από την υψομετρική διαφορά και απόσταση από τη θάλασσα, το ποσοστό ανάμειξης γλυκού με θαλασσινό νερό αλλά και τον ρυθμό εξάτμισης των βροχοπτώσεων. Επίσης, υψηλή αλατότητα εμφανίζεται σε ερημικές περιοχές, στα εδάφη των οποίων συσσωρεύονται άλατα επειδή ο ρυθμός εξάτμισης του νερού είναι κατά πολύ υψηλότερος του ρυθμού βροχόπτωσης, καθώς και σε υψηλά αρδευόμενες γεωργικές εκτάσεις. Στις τελευταίες, παρατηρείται συσσώρευση ιόντων στο έδαφος λόγω έντονης εξατμισοδιαπνοής. Στην περίπτωση αυτή οι επιπτώσεις σε επίπεδο γεωργικής παραγωγής είναι σημαντικές, επειδή τα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτικά είδη παρουσιάζονται ευαίσθητα σε συνθήκες έστω και ήπιας αλατότητας στο εδαφικό περιβάλλον.

Η καταπόνηση λόγω αλατότητας επιδρά δυσμενώς σε τρία διαφορετικά επίπεδα. Από τη στιγμή που αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του εδάφους, επηρεάζεται δυσμενώς το πορώδες και κατά συνέπεια ο αερισμός και η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων δημιουργούν χαμηλά δυναμικά νερού στο έδαφος και ως εκ τούτου εμφανίζεται μια μορφή υδατικής καταπόνησης (οσμωτική καταπόνηση). Στις συνθήκες αυτές δυσχεραίνεται η πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών από το εδαφικό περιβάλλον. Θα πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό, ότι τόσο η υδατική όσο και η καταπόνηση αλατότητας επηρεάζουν δυσμενώς ένα κοινό παράγοντα, το οσμωτικό δυναμικό.

Τα ιόντα Na^+ και Cl^- αυτά καθαυτά, παρουσιάζουν τοξικότητα. Παρουσία υψηλής συγκέντρωσης Na^+ παρουσιάζονται ανωμαλίες στην περατότητα των μεμβρανών και παρεμπόδιση ενζύμων. Γενικώς, κάνουν την εμφάνισή τους δυσλειτουργίες στην αφομοίωση του άνθρακα (λόγω παρεμπόδισης της φωτοσυνθετικής λειτουργίας, αλλά και επιτάχυνσης της αναπνευστικής δραστηριότητας ώστε να αντισταθμιστεί το ενεργειακό κόστος αποκλεισμού των ιόντων ή σύνθεσης νέων μεταβολιτών, ενώ επιβραδύνεται η ανάπτυξη των ευαίσθητων φυτικών ειδών. Εκτός αυτών, εμφανίζονται δυσχέρειες ως προς την πρόσληψη και μεταφορά απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων. Η τοξικότητα του Na^+ σχετίζεται κυρίως με τον ανταγωνισμό του ιόντος αυτού στην πρόσληψη K^+ και Ca^{++} . Μία σημαντική επίσης παρενέργεια της καταπόνησης λόγω της αλατότητας αποτελεί η εμφάνιση οξειδωτικής καταπόνησης σε μεταβολικό επίπεδο, λόγω της δημιουργίας ενεργών μορφών οξυγόνου [42].

Στρατηγικές αντιμετώπισης

Τα φυτά τα οποία αναπτύσσονται σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων ονομάζονται αλόφυτα. Οι αντίξοες συνθήκες τις οποίες δημιουργεί το περιβάλλον υψηλής αλατότητας αντιμετωπίζονται μέσω κυρίως δύο στρατηγικών :

Αποφυγή

Τα φυτά τα οποία έχουν επιλέξει την στρατηγική αυτή (ρυθμιστές αλατότητας), δεν επιτρέπουν την είσοδο των ιόντων στο εσωτερικό των ευαίσθητων κυττάρων. Η στρατηγική αυτή παρουσιάζεται με δύο παραλλαγές:

- ορισμένα φυτικά είδη δεν απορροφούν το αλάτι αλλά το αποκλείουν ενεργητικά στο εξωτερικό περιβάλλον των ριζών (π.χ. το είδος *Rhizophora mangle*).
- άλλοι ρυθμιστές αλατότητας επιτρέπουν την είσοδο του αλατιού, το οποίο οδηγείται προς και εκκρίνεται από εξειδικευμένους αλατώδεις αδένες των φύλλων (π.χ. το είδος *Tamarix*). Λειτουργούν δηλαδή σαν μηχανισμός αποτοξίνωσης εκκρίνοντας ιόντα και ανόργανα συστατικά που προκαλούν στο φυτό καταπόνηση.



Εικόνα 5.5. Παρατήρηση κρυστάλλων άλατος που εκκρίνονται από τους αλατούχους αδένες του φυτού *Tamarix Smyrnensis* κατά τη διάρκεια της υδροπονικής του καλλιέργειας. Η λήψη της φωτογραφίας πραγματοποιήθηκε με ψηφιακή μηχανή Canon Powershot A620.

Σε μελέτες για την δομή και την λειτουργία των αλατούχων αδένων των φυτών mangroves έχει συχνά υποτεθεί ότι τα βασικά ιόντα, αν όχι τα μοναδικά, που εκκρίνονται από αυτούς είναι Na^+ και Cl^- [47]. Παρόλα αυτά, το 1967, οι Berry και Thomson, διαπίστωσαν σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο φυτό *Tamarix aphylla* ότι οι αλατούχοι αδένες εκκρίνουν μεγάλη ποικιλία ιόντων (π.χ. Mg , Ca) και ανόργανων συστατικών (π.χ. βαρέα μέταλλα) και ότι οι εκκρίσεις αυτές είναι άμεσα συσχετισμένες με το εδαφικό περιβάλλον γύρω από την ρίζα.

Ανθεκτικότητα

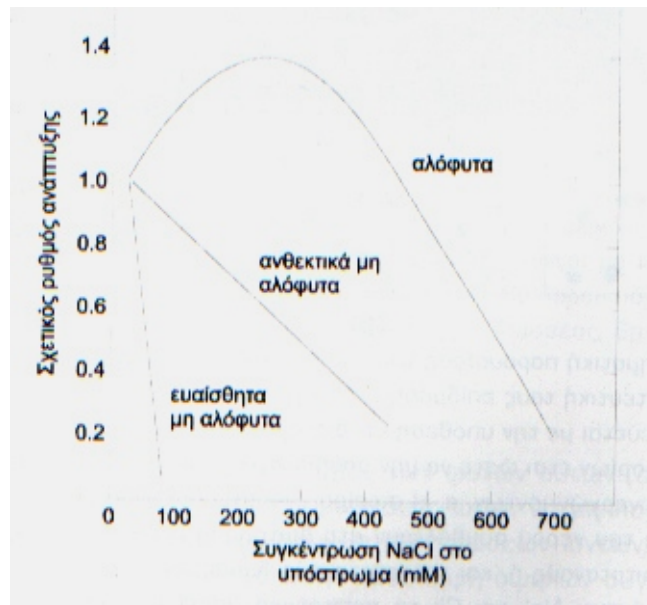
Ο μεταβολισμός των φυτών αυτών (συσσωρευτές άλατος) είναι κατάλληλα προσαρμοσμένος ώστε να μην παρουσιάζονται

δυσλειτουργίες παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων. Η επιβίωση των φυτών αυτών στηρίζεται στην πρόσληψη υψηλών συγκεντρώσεων αλατιού εντός των κυττάρων τους, έτσι ώστε να αντισταθμιστεί το χαμηλό δυναμικό νερού του εδάφους και να επιτυγχάνονται ικανοποιητικές πιέσεις σπαργής (π.χ. σε ορισμένα είδη φυτών του γένους *Atriplex*). Τα ιόντα συσσωρεύονται στο χυμοτόπιο, ενώ οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- κρατιούνται σε χαμηλά επίπεδα στο κυτόπλασμα. Τα ιόντα Na^+ οδηγούνται στο χυμοτόπιο μέσω ενός αντιμεταφορέα Na^+/H^+ ο οποίος εδράζεται στον τονοπλάστη. Η λειτουργία του αντιμεταφορέα αυτού σχετίζεται σε πολλές περιπτώσεις με την εκδήλωση ανθεκτικότητας. Π.χ. η υπερέκφρασή του σε φυτά του γένους *Arabidopsis* τα καθιστά ικανά να αναπτύσσονται σε υψηλές συγκεντρώσεις NaCl .

Το δυναμικό του νερού του κυτοπλάσματος εξισορροπείται με εκείνο του χυμοτοπίου έτσι ώστε να μην αφυδατωθεί, μέσω μηχανισμών οσμωρύθμισης ή οσμωτικής εξισορρόπησης. Η οσμωρύθμιση στο κυτόπλασμα επιτυγχάνεται με τη σύνθεση συμβατών οσμωλυτών, όπως της προλίνης, της σορβιτόλης και της βεταΐνης της γλυκίνης. Τα μόρια αυτά όπως έχει ήδη αναφερθεί, συμβάλλουν λόγω του χαμηλού μοριακού βάρους, στην αύξηση του οσμωτικού δυναμικού ενώ ταυτόχρονα είναι συμβατά με τις μεταβολικές δραστηριότητες και ταυτόχρονα είναι συμβατά με τις μεταβολικές δραστηριότητες και προστατεύουν ευαίσθητα μόρια από τη δυσμενή επίδραση των τοξικών ιόντων.

Οι συμβατοί οσμωλύτες παρουσιάζουν εξειδίκευση αφού κάθε φυτικό είδος χαρακτηρίζεται από την σύνθεση ορισμένων οσμωλυτών.

Πολυάριθμα φυτικά είδη (τα οποία εξ ορισμού επιλέγουν τη στρατηγική της διαφυγής), παρουσιάζουν ευαισθησία έναντι της παρουσίας αλατιού στο περιβάλλον τους, ενώ ακόμη και σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις άλατος (χαμηλότερες των 50 mM) επιφέρουν συνήθως ανεπανόρθωτες φυσιολογικές βλάβες.



Εικόνα 5.6. Η εξάρτηση της ταχύτητας ανάπτυξης από την συγκέντρωση αλατιού στο περιβάλλον μέσον για τρεις κατηγορίες φυτών.

Η καταπόνηση αλατότητας επιφέρει αφενός μεν τροποποιήσεις της μεταβολικής δραστηριότητας, αφετέρου *de novo* σύνθεση νέων πρωτεϊνών. Ορισμένες από τις πρωτεΐνες αυτές συντίθενται και υπό την επίδραση του ABA. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί και η οσμωτίνη, η οποία συντίθεται σε συνθήκες χαμηλού δυναμικού του νερού ή οσμωτικού σοκ. Η πρωτεΐνη αυτή εντοπίζεται στο χυμοτόπιο και σε ορισμένες περιπτώσεις η συγκέντρωσή της μπορεί να φτάσει το 12% του συνόλου των πρωτεϊνών ιστών.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1. Καλλιέργεια του φυτού *Tamarix Smyrnensis*

Το φυτό *Tamarix Smyrnensis* ανήκει στην οικογένεια Tamaricaceae. Είναι αυτοφυές, δικοτυλήδονο φυτό και φύεται συνήθως σε μεσογειακές περιοχές. Το ύψος του κυμαίνεται από 1-15m, διαθέτει μεγάλη βιομάζα και μπορεί να αναπτυχθεί σε μεγάλη ποικιλία εδαφών αν και συνήθως συναντάται σε φτωχά, αμμώδη εδάφη και σε ηλιόλουστες κυρίως θέσεις [47]. Τα φυτά το γένους αυτού είναι ανθεκτικά τόσο στην έντονη αλκαλικότητα όσο και στην έντονη αλατότητα (αλόφυτα) [48]. Έχει μάλιστα αποδειχθεί ότι η στρατηγική αντιμετώπισης της καταπόνησης που υφίσταται το *Tamarix Smyrnensis* όταν εκτίθεται σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων σχετίζεται με την έκκριση αυτών από εξειδικευμένους αλατώδεις αδένες που εντοπίζονται στην επιφάνεια των φύλλων του. Υπάρχουν δε ενδείξεις που φανερώνουν ότι τα ιόντα που αναμένεται να εκκριθούν σχετίζονται άμεσα με τις συνθήκες που επικρατούν στο ριζικό περιβάλλον του φυτού [51].

Η ικανότητα λοιπόν του φυτού αυτού να αναπτύσσει μεγάλη βιομάζα σε συνδιασμό με τους μηχανισμούς αποφυγής που ενεργοποιεί όταν αναπτύσσεται σε περιβάλλον που του δημιουργεί καταπόνηση οδήγησαν σε μια σειρά μελετών, ένα τμήμα των οποίων αποτελεί και η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, που είχαν σαν στόχο

την εξέταση της δυνατότητας του *Tamarix Smyrnensis* να προσλαμβάνει, να συσσωρεύει και να εκκρίνει μόλυβδο και κάδμιο από ρυπασμένα εδάφη.

6.1.1. Συλλογή φυτικού υλικού και καλλιέργεια σε οργανικό υπόστρωμα

Τον Μάρτιο 2007 πραγματοποιήθηκε συλλογή εμφυτευμάτων μήκους 10-15 cm του φυτού *Tamarix Smyrnensis* από την παράκτια ζώνη των Αγίων Αποστόλων, περιοχή που τοποθετείται 3 χιλιόμετρα μακριά από την πόλη των Χανίων (βλ. παράρτημα). Μετά τη συλλογή τους, τα εμφυτεύματα τοποθετήθηκαν εντός ενός θαλάμου ελέγχου υγρασίας (mist propagator). Στα εμφυτεύματα προστέθηκαν αυξητικές ορμόνες για την ενίσχυση της ανάπτυξής τους.

Έπειτα από 8 μέρες, διάστημα ικανό για να αναπτύξουν τα εμφυτεύματα ριζικό σύστημα, μεταφυτεύτηκαν το καθένα ξεχωριστά σε πλαστικές γλάστρες που περιείχαν ίδιας ποσότητας οργανικό υπόστρωμα (Blumenerde, Capriflor, Germany) και παρέμειναν σε αυτές για περίπου 2 μήνες (Απρίλιος - Μάιος 2007) έτσι ώστε να αναπτυχθούν και να εγκλιματιστούν στο ίδιο περιβάλλον που θα πραγματοποιούνταν και η υδροπονική τους καλλιέργεια. Οι γλάστρες τοποθετήθηκαν σε γυάλινο θερμοκήπιο στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο Ακρωτήρι Χανίων (βλ. παράρτημα) . Κάθε δύο ημέρες παρέχόταν στα εμφυτεύματα νερό βρύσης.

Δύο μήνες μετά, αφού έγινε επιλογή των 24 φυτών που θα συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία, ακολούθησε η ταξινόμησή τους σε 9 ομάδες, καθεμία από τις οποίες περιλάμβανε 3 φυτά εκτός από τις 3 πρώτες ομάδες που περιλάμβαναν 2 φυτά και αποτελούσαν τις ομάδες ελέγχου (control groups). Ο σχεδιασμός του πειράματος παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 6.1.

6.1.2. Υδροπονική καλλιέργεια

Τα κατάλληλα ομαδοποιημένα φυτά αφαιρέθηκαν προσεκτικά, ώστε να μην τραυματιστεί το ριζικό τους σύστημα, από τις γλάστρες και πραγματοποιήθηκε πλύση τόσο το υπέργειου τμήματός τους όσο και του ριζικού τους συστήματος με νερό βρύσης και έπειτα με απιονισμένο νερό για να απομακρυνθεί η σκόνη και όλο το χώμα από τις ρίζες τους αντίστοιχα.

Παράλληλα με την παραπάνω διαδικασία, πραγματοποιούνταν και η τελική τοποθέτησή τους σε πλαστικά δοχεία (όγκου 3 λίτρων) τα οποία είχαν καλυφθεί με αλουμινόχαρτο για αποφυγή έκθεσης του ριζικού συστήματος στην ηλιακή ακτινοβολία (βλ. παράρτημα). Η υδροπονική καλλιέργειά τους είχε καθοριστεί να διαρκέσει 14 ημέρες. Παρόλα αυτά, διακόπηκε μετά το πέρας της 10^{ης} ημέρας, λόγω εμφάνισης έντονων συμπτωμάτων καταπόνησης στα περισσότερα φυτά που συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία. Η διεξαγωγή του πειράματος έλαβε χώρα στο ίδιο θερμοκήπιο που είχαν καλλιεργηθεί τα φυτά τους προηγούμενους δύο μήνες.

Τη στήριξη των φυτών κατά το διάστημα διεξαγωγής του πειράματος παρείχαν τετράγωνα κομμάτια από φελιζόλ τα οποία απέτρεπαν επιπλέον την εξάτμιση του θρεπτικού διαλύματος που είχε προηγουμένως τοποθετηθεί εντός των δοχείων.

Το θρεπτικό διάλυμα προσαρμόστηκε από το τροποποιημένο Arnon και Knop (10%), χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα φυτά και είχε την ακόλουθη σύσταση ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) : $143.0 \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2$, 35.75 KNO_3 , 17.75 KCl , $35.75 \text{ KH}_2\text{PO}_4$, 35.75 MgSO_4 , $2.86 \text{ H}_3\text{BO}_3$, $1.86 \text{ MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0.22 \text{ ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.079 \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ και $0.6 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Στις ομάδες ελέγχου A, B και C, η αλατότητα ήταν διαβαθμισμένη, συγκέντρωσης 0 mM, 100 mM και 200 mM για κάθε ομάδα αντίστοιχα. Ομοίως έγινε και για τις D, E, F και G, H, J ομάδες, στις οποίες πρώτες προστέθηκε επιπλέον μόλυβδος συγκέντρωσης 100 ppm σε μορφή $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ και στα δεύτερες κάδμιο συγκέντρωσης 5 ppm σε μορφή $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Experimental group	Code name	Pb concentration (ppm)	Cd concentration (ppm)	Salt concentration (mM)
A	0/0	0	0	0
B	0	0	0	100
C	0	0	0	200
D	Pb/0	100	0	0
E	Pb/100	100	0	100
F	Pb/200	100	0	200
G	Cd/0	0	5	0
H	Cd/100	0	5	100
J	Cd/200	0	5	200

Πίνακας 6.1. Ομαδοποίηση των φυτών και πειραματικός σχεδιασμός.

Από τη στιγμή που ολοκληρώθηκε η διαδικασία τοποθέτησης των φυτών στο υδροπονικό σύστημα (βλ. παράρτημα) , άρχισε και η τροφοδοσία των ριζών τους με αέρα. Αεροσυμπιεστής διοχέτευε αέρα και στα 24 δοχεία.

Τρεις φορές την ημέρα πραγματοποιούνταν μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας (βλ. Πίνακα 6.2). Η θερμοκρασία κυμάνθηκε μεταξύ 19-46°C. Επίσης, κάθε ημέρα συμπληρωνόταν σε κάθε δοχείο με απιονισμένο νερό η ποσότητα θρεπτικού διαλύματος που είχε εξατμιστεί ώστε να διατηρείται ο όγκος του σταθερός.

Ημερομηνία	Ημερομηνία	Θερμοκρασία(°C)	Υγρασία (%)
	average	range	average
Δ 04/06	31.0	21.5-40	35.7
Τ 05/06	33.7	19-46	34.3
Τ 06/06	33.8	20-41	33.5
Π 07/06	36.5	19-43	47.0
Π 08/06	39.7	19-44	42.3
Σ 09/06	33.8	20-40.5	50.0
Κ 10/06	37.0	19.5-44	48.3
Δ 11/06	39.3	21- 45	45.3
Τ 12/06	39.5	19.5-44.5	47.5

Πίνακας 6.2. Διακύμανση θερμοκρασίας και υγρασίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

6.2. Αναλύσεις

6.2.1. Εκτίμηση χλωροφύλλης

Μετά τη λήξη της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε συλλογή 0.2 gr φρέσκων φύλλων από κάθε φυτό που περιλαμβάνόταν στις τέσσερις εκ των εννέα ομάδων (A, B, D και E), οι οποίες ήταν οι μοναδικές στις οποίες μπορούσε να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της χλωροφύλλης μιας και στις υπόλοιπες τα συμπτώματα καταπόνησης λόγω αλατότητας και βαρέων μετάλλων την απέτρεπαν. Τα φύλλα ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και αποθηκεύτηκαν στους -220 °C μέχρι την τελική μέτρηση, η οποία έπρεπε να πραγματοποιηθεί μέσα σε 24 ώρες. Η εκτίμηση της χλωροφύλλης πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη μέθοδο Harborne [49].

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα φύλλα αφού τοποθετήθηκαν σε γουδί- γουδοχέρι πορσελάνης ομογενοποιήθηκαν με διάλυμα ακετόνης (80%) μέχρι να αποχρωματιστούν τελείως. Το απόσταγμα τοποθετήθηκε σε φυγόκεντρο τύπου Centrifuge MSE Sanyo. Η φυγοκέντρωση πραγματοποιήθηκε δύο φορές από 1 min την κάθε φορά σε 16.000χg με σκοπό τον διαχωρισμό του αποχρωματισμένου φυτικού ιστού από το υπόλοιπο απόσταγμα. Το τελευταίο τοποθετήθηκε σε γυάλινες κυψελίδες και αμέσως πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της συνολικής χλωροφύλλης, της χλωροφύλλης a και b, χρησιμοποιώντας φασματοφωτόμετρο ατομικής εκπομπής τύπου UV-Vis Spectrophotometer, UNICAM model Helios Delta.

Οι μετρήσεις έγιναν με ακριβή προσδιορισμό της απορρόφησης σε διαφορετικά μήκη κύματος. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ως τυφλό διάλυμα αυτό της ακετόνης, η απορρόφηση μετρήθηκε στα 663 και 646 nm και ο υπολογισμός της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους :

$$\text{Total chlorophyll} = (17.3 * A_{646}) + (7.18 * A_{663})$$

$$\text{Chlorophyll a (mg/l)} = (12.21 * A_{663}) - (2.81 * A_{646})$$

$$\text{Chlorophyll b (mg/l)} = (20.13 * A_{646}) - (5.03 * A_{663})$$

Όπου:

Total chlorophyll : η συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης (mg/l)

Chlorophyll a: η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a (mg/l)

Chlorophyll b: η συγκέντρωση της χλωροφύλλης b (mg/l)

A: η απορρόφηση της χλωροφύλλης

6.2.2. Προσδιορισμός συγκέντρωσης μολύβδου (Pb) και καδμίου (Cd) στον φυτικό ιστό

Τα οργανικά υλικά στον φυτικό ιστό καταστρέφονται μέσω διεργασιών υγρής ή ξηρής οξείδωσης. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην οξείδωση του οργανικού υλικού με τη χρήση της θερμότητας και/ ή οξέων. Η ξηρή καύση είναι μέθοδος που εφαρμόστηκε στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία και πρόκειται για μια απλή μέθοδο, η οποία το μόνο που απαιτεί είναι ένα ανόργανο οξικό διάλυμα για την διαλυτοποίηση της στάχτης. Παρακάτω, ακολουθούν αναλυτικά τα στάδια της μεθόδου.

Το υπέργειο τμήμα των φυτών, αφού συλλέχθηκε, ξεπλύθηκε με νερό βρύσης και έπειτα με απιονισμένο νερό και τοποθετήθηκε προς ξήρανση για 48 ώρες στους 65 °C, αφού προηγουμένως είχε ζυγιστεί το φρέσκο βάρος σε όσα φυτά επιτρεπόταν (βλ. παράρτημα). Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για όλες τις ρίζες. Στη συνέχεια, αφού υπολογίστηκε το ξηρό βάρος των δύο τμημάτων του φυτού, όλα τα δείγματα αλέστηκαν σε μύλο, τοποθετήθηκαν προς ξήρανση σε κλίβανο και αποθηκεύτηκαν μέχρι την μέτρηση της περιεκτικότητας του ιστού τους σε βαρέα μέταλλα. Η περιεκτικότητα του φυτικού ιστού σε μόλυβδο και κάδμιο πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τροποποιημένη τη μέθοδο Soon (Dry Ash Oxidation Procedure) [50].

Για κάθε φυτό, λήφθηκαν 0.5 gr ξηρού και αλεσμένου δείγματος από το υπέργειο τμήμα και όμοιας ποσότητας δείγμα από τη ρίζα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε πορσελάνινες κάψες σε κλίβανο για 16 ώρες στους 480 °C. Η στάχτη στην οποία είχε μετατραπεί ο φυτικός ιστός, αφού κρύωσε, διαλύθηκε σε 10 ml διαλύματος 2N HCl και έπειτα η κάψα τοποθετήθηκε σε θερμαινόμενη πλάκα στους 100 °C περίπου για λίγα λεπτά, έτσι ώστε να διαλυθούν τελείως τα κομμάτια του δείγματος μέσα σε αυτή. Στην συνέχεια η κάψα απομακρύνθηκε από την πλάκα προτού προλάβει να βράσει. Έπειτα, ακολούθησε η διήθηση του περιεχομένου της κάψας (χρησιμοποιήθηκε διηθητικό χαρτί Whatman) σε ογκομετρικές φιάλες χωρητικότητας 50 ml. Μετά την πρώτη διήθηση, η κάψα ξεπλύθηκε 2 φορές με απιονισμένο νερό και τα ξεπλύματα διηθήθηκαν επίσης στο ίδιο χαρτί. Σε ορισμένα φυτά που το δείγμα του φυτικού ιστού δεν ήταν επαρκές (βλ. παράρτημα), πραγματοποιήθηκε διήθηση αυτού σε ογκομετρικές φιάλες χωρητικότητας 25 mL. Ακολούθησε μετάγγιση των διαλυμάτων σε φιαλίδια Falcon και αποθήκευσή τους σε ψυγείο μέχρι την τελική μέτρηση των βαρέων μετάλλων στα

δείγματα, η οποία πραγματοποιήθηκε σε Φασματοφωτόμετρο Ατομικής Εκπομπής (Leeman Labs PS1000AT Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) στο Μεσογειακό και Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων (MAICh).

6.2.3. Προσδιορισμός συγκέντρωσης μολύβδου (*Pb*) και καδμίου (*Cd*) στο θρεπτικό διάλυμα

Την ημέρα έναρξης της υδροπονικής καλλιέργειας του *Tamarix Smyrnensis*, την 5η καθώς και την 10^η ημέρα, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία θρεπτικού διαλύματος όγκου 10 ml σε φιαλίδια Falcon. Τα φιαλίδια αποθηκεύτηκαν στους -22°C μέχρι τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων, η οποία πραγματοποιήθηκε σε Φασματοφωτόμετρο Ατομικής Εκπομπής (Leeman Labs PS1000AT Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) στο Μεσογειακό και Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων (MAICh).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

7.1. Μελέτη συσσώρευσης μολύβδου (Pb) από το *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας

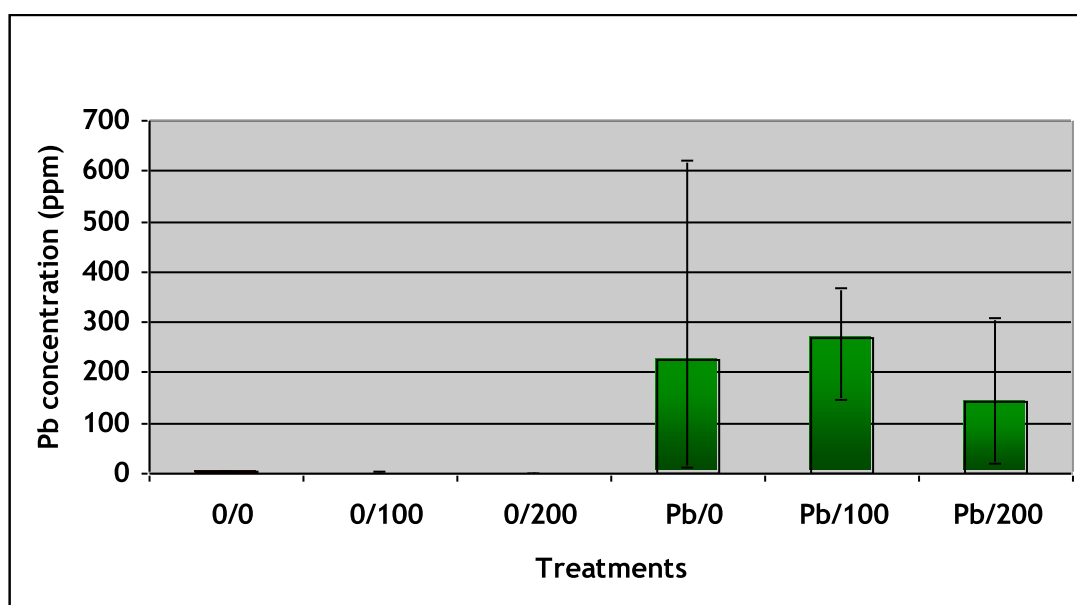
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και αφορούσαν στην μελέτη της πρόσληψης, συσσώρευσης του μολυβδου από το *Tamarix Smyrnensis* και κατανομής του στον φυτικό ιστό υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών αλατότητας παρουσιάζονται αναλυτικά στα γραφήματα που ακολουθούν.

Στο Γράφημα 7.1 φαίνεται ότι το *Tamarix Smyrnensis* συγκέντρωσε τον περισσότερο μόλυβδο στον φυτικό ιστό του υπέργειου τμήματός του όταν προστέθηκε στο θρεπτικό του διάλυμα μικρή συγκέντρωση NaCl (Pb/100)*. Στην ομάδα αυτή των φυτών, το ποσοστό αύξησης της συγκέντρωσης του μολύβδου ήταν περίπου 20% σε σχέση με την ομάδα αυτών στα οποία η αλατότητα ήταν μηδενική (Pb/0). Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση αυτή (Pb/100), στην οποία το φυτό παρουσίασε την μέγιστη συγκέντρωση μολύβδου η τιμή της οποίας ήταν 269.33 ppm, η τιμή αυτή δεν υπερέβη τα όρια τοξικότητας του μολύβδου στα φύλλα των φυτών η οποία κυμαίνεται από 30-300 ppm ξηρού βάρους [51], παρόλο που ξεπέρασε κατά πολύ τις

** Συντόμευση πειραματικών συνθηκών(βλ. Πίνακα 6.1).

φυσιολογικές τιμές μολύβδου που για τα φυτά κυμαίνονται μεταξύ 5-10 ppm ξηρού βάρους.

Η αρνητική επίδραση της αλατότητας στο φυτό φαίνεται στην στήλη (Pb/200) του Γραφήματος 7.1. Στα φυτά της ομάδας αυτής η καταπόνηση ήταν τόσο σφοδρή που προκάλεσε τον θάνατό τους πριν την καθορισμένη λήξη της πειραματικής διαδικασίας. Τα φυτά αυτά σταμάτησαν λοιπόν νωρίς να προσλαμβάνουν μόλυβδο, γεγονός που είχε σαν συνέπεια την εμφάνιση χαμηλότερης συγκέντρωσης στο υπέργειο τμήμα τους από τις υπόλοιπες ομάδες φυτών. Η έντονη αυτή καταπόνηση που προκάλεσε αυτή τη μείωση στην συγκέντρωση του μολύβδου πιθανώς οφείλεται στα έντονα συμπτώματα τοξικότητας που υπέστησαν τα φυτά αυτής της ομάδας από την παρουσία του μετάλλου αλλά και της υψηλής συγκέντρωσης NaCl, η οποία ξεπερνούσε τα όρια ανθεκτικότητας του φυτού.



Γράφημα 7.1. Συγκέντρωση Pb (ppm) στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Σε αντιστοιχία με το Γράφημα 7.1 διαπιστώνουμε ότι κυμάνθηκαν και τα αποτελέσματα που αφορούσαν την συνολική συσσώρευση του μολύβδου στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis*, παράμετρος που πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπόψη προκειμένου να διαπιστωθεί αν μπορεί το φυτό να χρησιμοποιηθεί για φυτοεξαγωγή. Η συνολική συσσώρευση του μετάλλου υπολογίστηκε από τον ακόλουθο τύπο (βλ. αναλυτικά αποτελέσματα στο παράρτημα):

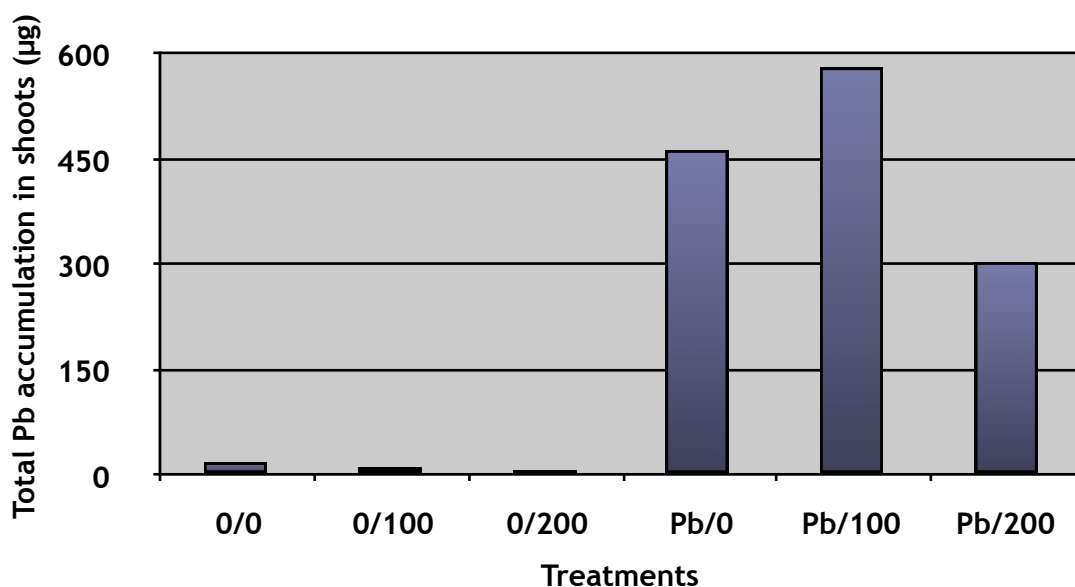
$$\text{Total accumulation} = (\text{Plant Biomass}) * (\text{Metal concentration in shoots})$$

Όπου:

Total accumulation : η συνολική συσσώρευση του μετάλλου (mg)

Plant biomass : η ξηρή βιομάζα του φυτού (g)

Metal concentration in shoots : η συγκέντρωση του μετάλλου στο υπέργειο τμήμα του φυτού (ppm)



Γράφημα 7.2. Συνολική συσσώρευση του μολύβδου (μg) στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό της συνολικής συσσώρευσης του μολύβδου στους βλαστούς του *Tamarix Smyrnensis* παρουσιάζονται στο Γράφημα 7.2, στο οποίο φαίνεται η συνολική επίδραση της αλατότητας στην διαμόρφωση της πρόσληψης και συγκέντρωσης του μολύβδου στον φυτικό ιστό σε συνδυασμό με την επίδραση αυτής στην ανάπτυξη της βιομάζας του φυτού.

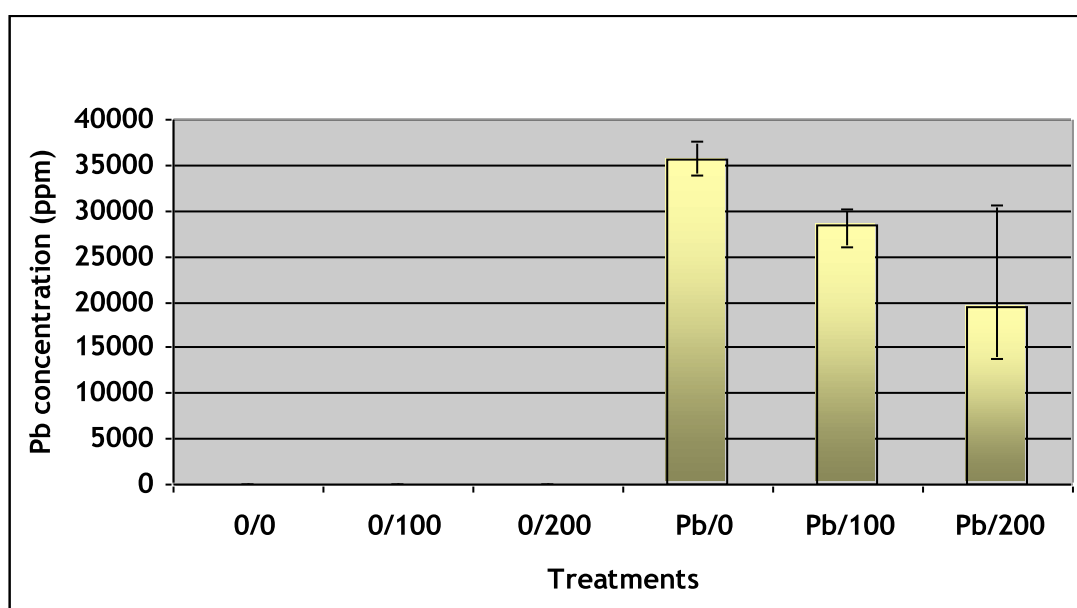
Συγκεκριμένα, παρατηρώντας το Γράφημα 7. 2 διαπιστώνουμε ότι όταν η αλατότητα στο θρεπτικό διάλυμα ήταν μηδενική, το φυτό συσσώρευσε 465 μg μέσα στο χρονικό διάστημα των 10 ημερών, ενώ σε αλατότητα συγκέντρωσης 100 mM και 200 mM, η συνολική συσσώρευση ήταν 579 μg και 303 μg αντίστοιχα. Η μείωση που παρουσιάστηκε στην συνολική συσσώρευση του μολύβδου οφείλεται όπως προαναφέρθηκε και στο Γράφημα 7.1 στην τοξικότητα που προκάλεσε η υψηλή συγκέντρωση NaCl (200 mM).

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την μελέτη των γραφημάτων 7.1 και 7.2 είναι ότι η συνολική επίδραση της αλατότητας στην συσσώρευση του μολύβδου στο υπέργειο τμήμα του φυτού, λαμβάνοντας υπόψη και την μείωση που προκάλεσε η συνέργεια των δύο αυτών παραγόντων στην βιομάζα του φυτού ήταν θετική στην περίπτωση που η αλατότητα είχε χαμηλή συγκέντρωση (100 mM).

Σε προηγούμενες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα είδη φυτών, διαπιστώθηκε ότι ο μόλυβδος σαφώς συσσωρεύεται στο ριζικό σύστημα σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες απ' ότι στο υπέργειο τμήμα των φυτών. Οι Kumar *et al.*, απέδειξαν ότι η

συσσώρευση του μολύβδου στις ρίζες φυτών της οικογένειας Brassicaceae άγγιξε το 90%, ενώ οι Sekhar *et al* εντόπισαν ότι το βασικό μέρος της συσσώρευσης του μολύβδου στο φυτό *Hemidesmus indicus* ήταν επίσης οι ρίζες του [55].

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πείραμα ορίζουν επίσης τις ρίζες ως το τμήμα αυτό του φυτού στο οποίο παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση μολύβδου. Συγκεκριμένα, το ποσοστό του μολύβδου που συσσωρεύτηκε στις ρίζες κυμάνθηκε από 97 μέχρι 99% της συνολικής ποσότητας του μολύβδου που συσσωρεύτηκε στο φυτό. Η συγκέντρωση του μολύβδου στις ρίζες φαίνεται στο γράφημα που ακολουθεί.



Γράφημα 7.3. Συγκέντρωση Pb (ppm) στο ριζικό σύστημα του *Tamarix Smyrnenensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι (n=2 για τις ομάδες ελέγχου και n=3 για τις υπόλοιπες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Στο Γράφημα 7.3 φαίνεται ότι η αυξανόμενη αλατότητα προκάλεσε διαδοχική μείωση στην συγκέντρωση του μολύβδου στις ρίζες του

φυτού με έναν ανάλογο μάλιστα τρόπο. Όταν στα φυτά προστέθηκε NaCl συγκέντρωσης 200 mM, η πρόσληψη του μολύβδου στις ρίζες μειώθηκε περίπου κατά το ήμισυ συγκριτικά με τα φυτά στα οποία δεν έχει προστεθεί καθόλου NaCl.

Αυτό ίσως οφείλεται στις επιπτώσεις που επέφερε η αυξημένη συγκέντρωση του NaCl στο ριζικό σύστημα. Οι τελευταίες σχετίζονται με μείωση της βιομάζας του, δυσχέρεια στην πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών από το ριζικό περιβάλλον, δυσμενή επίδραση στο οσμωτικό δυναμικό και παρεμπόδιση της λειτουργίας πολλών ενζύμων (βλ. Κεφάλαιο 5.2).

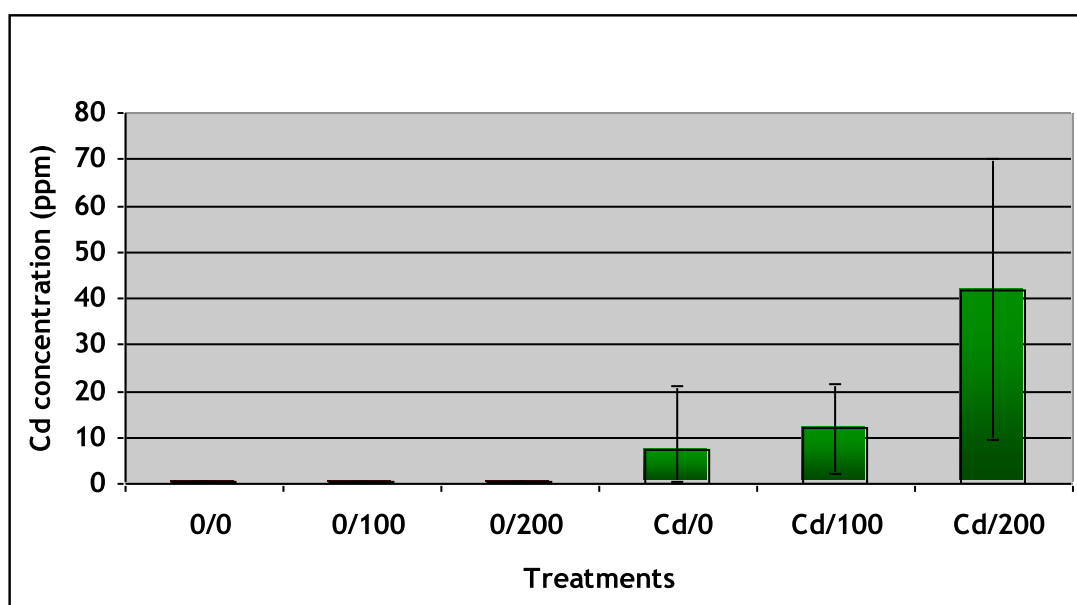
Οπτική παρατήρηση στο ριζικό σύστημα των φυτών κατά την διάρκεια της υδροπονικής καλλιέργειας έδειξε ότι εκτός από την ομάδα ελέγχου στην οποία δεν είχε προστεθεί NaCl (0/0) και η οποία παρουσίαζε υγιέστατο ριζικό σύστημα συνεχώς αναπτυσσόμενο, όλα τα υπόλοιπα φυτά εμφάνιζαν καταπονημένο και εύθραυστο ριζικό σύστημα. Συγκεκριμένα, στις ομάδες των φυτών στις οποίες είχε προστεθεί μόλυβδος, το χρώμα των ριζών τους ήταν σκούρο καφέ, το οποίο αποτελεί σύμπτωμα τοξικότητας από την παρουσία του μετάλλου [52].

Η μεγάλη διαφορά στις συγκεντρώσεις του μολύβδου στο υπέργειο τμήμα σε σύγκριση με τις τιμές της συγκέντρωσης που εμφανίζονται στις ρίζες αυτών, υποδηλώνουν ίσως την ύπαρξη ενός μηχανισμού αποφυγής που ενεργοποιούν τα φυτά παρουσία ορισμένων μετάλλων, ο οποίος εμποδίζει την μεταφορά τους στο υπέργειο τμήμα, περιορίζοντάς τα στη ρίζα. Ωστόσο, ο μηχανισμός αυτός δεν αρκεί για να δικαιολογήσει την τεράστια απόκλιση στις συγκεντρώσεις των δύο αυτών μερών του φυτού στο συγκεκριμένο πείραμα. Είναι προφανές ότι κατά την διάρκεια της υδροπονικής

καλλιέργειας των φυτών, ο μηχανισμός της προσρόφησης συνέβαλε καθοριστικά στις κατά πολύ μεγαλύτερες τιμές συσσώρευσης στις ρίζες του *Tamarix Smyrnensis*.

7.2. Μελέτη συσσώρευσης καδμίου (Cd) από το *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και αφορούσαν στην μελέτη της πρόσληψης, συσσώρευσης του καδμίου από το *Tamarix Smyrnensis* και κατανομής του στον φυτικό ιστό υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών αλατότητας παρουσιάζονται αναλυτικά στα γραφήματα που ακολουθούν.



Γράφημα 7.4. Συγκέντρωση του καδμίου (ppm) στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Από το Γράφημα 7.4 μπορεί κανείς εύκολα να διακρίνει την μεταβολή που επήλθε στην συγκέντρωση του καδμίου στο υπέργειο τμήμα του φυτού, όταν στο θρεπτικό διάλυμα προστέθηκε NaCl. Στην περίπτωση της ομάδας των φυτών στα οποία η συγκέντρωση του NaCl ήταν 100 mM, η τιμή της συγκέντρωσης του καδμίου στο υπέργειο τμήμα του φυτού από 7.5 ppm περίπου που εμφάνιζε σε

συνθήκες μηδενικής αλατότητας αυξήθηκε στα 11.8 ppm, ενώ όταν προστέθηκε NaCl συγκέντρωσης 200 mM η συγκέντρωση του καδμίου ανήλθε στα 42 ppm περίπου. Συγκρίνοντας δε κανείς την συγκέντρωση του καδμίου στο υπέργειο τμήμα σε συνθήκες μηδενικής αλατότητας (Cd/0), και αλατότητας συγκέντρωσης 200 mM (Cd/200), διαπιστώνει θεαματική αύξηση που αγγίζει το 455%.

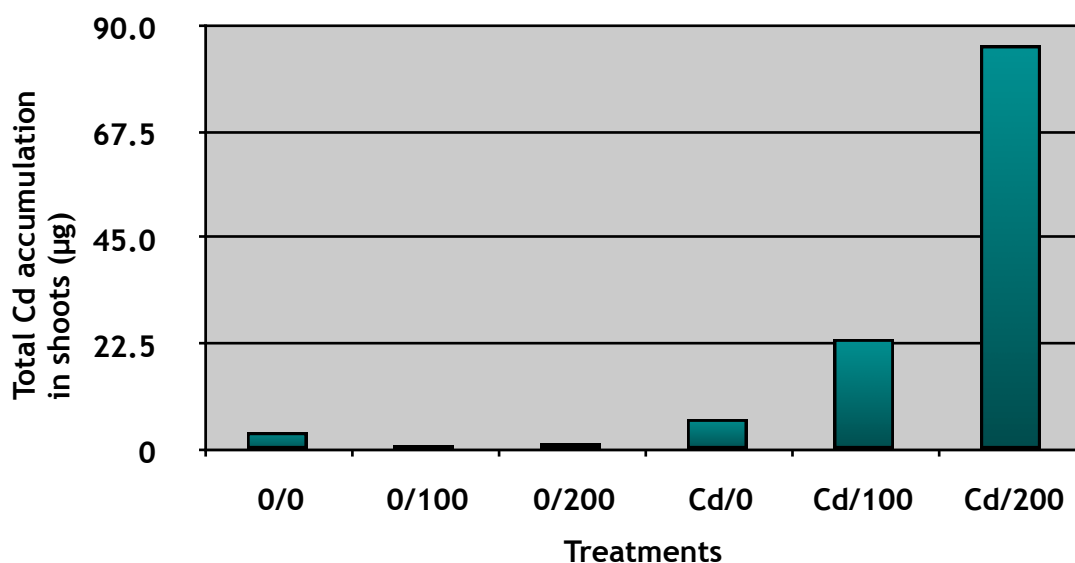
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται λοιπόν, ότι όταν η αλατότητα λειτούργησε σε συνέργια με το κάδμιο, βοήθησε περισσότερο στην πρόσληψη του μετάλλου από το φυτό και μεταφορά του στο υπέργειο τμήμα, σε σχέση με την περίπτωση που λειτούργησε σε συνέργια με το μόλυβδο. Βέβαια είναι γνωστό ότι το κάδμιο είναι ένα σχετικά πιο ευκίνητο μέταλλο, γεγονός που ίσως συνέβαλε επιπλέον. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με τις μελέτες Kadukova *et al.* και Manousaki *et al.* που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο φυτό σε συνθήκες πεδίου, στις οποίες εξήχθησαν τα ίδια συμπεράσματα για την συνεργιστική δράση της αλατότητας με το μόλυβδο ή το κάδμιο αντίστοιχα [51],[52].

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση του καδμίου στο υπέργειο τμήμα του φυτού, παρουσία 200 mM NaCl, ξεπέρασε τα όρια τοξικότητας του καδμίου στα φύλλα των φυτών, τα οποία κυμαίνονται από 5-30 ppm [51]. Η καταπόνηση που υπέστη το φυτό από την παρουσία του μετάλλου ίσως απαγόρευσε την ενεργοποίηση μηχανισμών αποφυγής της πρόσληψης των μετάλλων στο υπέργειο τμήμα του όπως φαίνεται να έγινε στην περίπτωση των φυτών που τροφοδοτήθηκαν με μόλυβδο.

Οι Dahmani και Muller διαπίστωσαν ότι φυτά τα οποία αναπτύχθηκαν σε εδάφη εμπλουτισμένα με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, εμφάνιζαν υψηλότερες συγκεντρώσεις των

μετάλλων αυτών στα ξηρά απ' ότι στα χλωρά τους φύλλα, εντοπίζοντας έτσι έναν ακόμη μηχανισμό αποτοξίνωσης που φάνηκε ότι ενεργοποιούν τα φυτά όταν εκτίθενται σε συνθήκες καταπόνησης. Οι Ernst *et al.* επίσης πρότειναν την πτώση των φύλλων ως μηχανισμό αποτοξίνωσης ορισμένων φυτών [56]. Βασιζόμενοι σε αυτές τις διαπίστώσεις, μπορούμε να ισχυριστούμε επιπλέον ότι η ομάδα των φυτών η οποία ξεπέρασε τα όρια τοξικότητας του καδμίου στα φύλλα των φυτών της, ίσως ενεργοποίησε μιας τέτοιας μορφής μηχανισμό αποτοξίνωσης, αφού από τις πρώτες κιόλας μέρες της πειραματικής διαδικασίας εμφάνισε ξηρά φύλλα των οποίων στη συνέχεια ακολούθησε η πτώση.

Η ανταπόκριση του φυτού στην πρόσληψη του καδμίου, το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης σε συνεχώς αυξανόμενες συγκεντρώσεις NaCl (Γράφημα 7.4), φαίνεται να είναι όμοια και ως προς την συνολική συσσώρευσή του στο υπέργειο τμήμα του φυτού, παράμετρος που πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπόψη προκειμένου να διαπιστωθεί αν μπορεί το φυτό να χρησιμοποιηθεί για φυτοεξαγωγή. Ομοίως με την περίπτωση των ομάδων των φυτών που καλλιεργήθηκαν παρουσία μολύβδου (βλ. Παράγραφο 7.1) πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός της συνολικής συσσώρευσης των ομάδων των φυτών που καλλιεργήθηκαν παρουσία καδμίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Γράφημα 7.5.



Γράφημα 7.5. Συνολική συσσώρευση του καδμίου (μg) στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Παρατηρώντας κανείς το γράφημα αυτό, εύκολα μπορεί να διαπιστώσει ότι η αύξηση στην συγκέντρωση της αλατότητας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση και στην συνολική συσσώρευση του καδμίου στους βλαστούς του *Tamarix Smyrnensis*, η οποία εκφράζει την συνολική επίδραση της αλατότητας στην διαμόρφωση της πρόσληψης και συγκέντρωσης του μολύβδου στον φυτικό ιστό σε συνδυασμό με την επίδραση αυτής στην βιομάζα του φυτού.

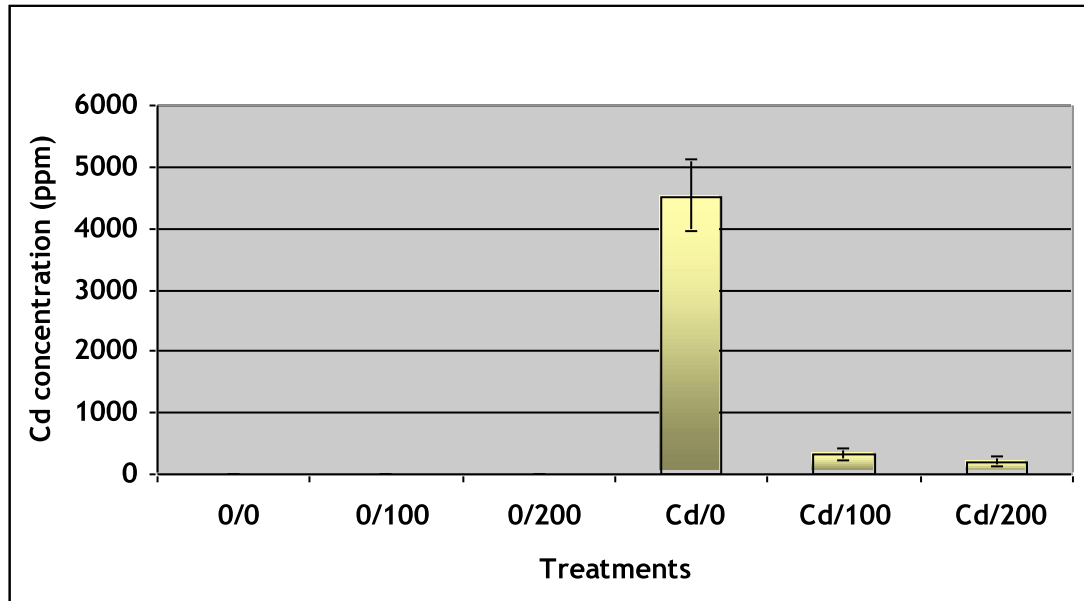
Συγκεκριμένα, η συσσώρευσή του αυξήθηκε κατά περίπου 250% σε συνθήκες αλατότητας 100 mM (Cd/100) και 1170% σε συνθήκες αλατότητας 200 mM (Cd/200) αντίστοιχα, σε σχέση με την περίπτωση στην οποία η αλατότητα ήταν μηδενική. Συγκεκριμένα, από 6.75 μg αυξήθηκε διαδοχικά σε 23.6 μg και 85.7 μg.

Παρά τη συμφωνία που προκύπτει με προγενέστερες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο φυτό σε συνθήκες πεδίου όσον αφορά την αύξηση της συγκέντρωσης του καδμίου στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix Smyrnensis* παρουσία NaCl, το ίδιο δεν ισχύει και για τις τιμές

των συγκεντρώσεων του καδμίου στις ρίζες. Σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Manousaki *et al.* διαπιστώθηκε ότι η αυξανόμενη αλατότητα προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης του καδμίου τόσο στο υπέργειο τμήμα όσο και στο ριζικό του σύστημα [51], ενώ στη συγκεκριμένη μελέτη, παρατηρώντας το γράφημα που ακολουθεί διαπιστώνεται το αντίθετο.

Στο Γράφημα 7.6 φαίνεται ότι η συγκέντρωση του καδμίου στις ρίζες μειώθηκε κατά περίπου 96% όταν η τιμή συγκέντρωσης της αλατότητας διαφοροποιήθηκε από μηδέν (Cd/0) σε 200mM (Cd/200) (βλ. Γράφημα 7.6). Μάλιστα, στα φυτά αυτών των ομάδων επήλθε ο θάνατος προτού τελειώσει η πειραματική διαδικασία, οπότε σταμάτησαν να προσλαμβάνουν κάδμιο αρκετά νωρίς. Αντίστοιχη μείωση της συγκέντρωσης του καδμίου στις ρίζες του *Tamarix Smyrnensis* σε συνθήκες αυξανόμενης αλατότητας παρουσιάστηκε όταν το φυτό εκτέθηκε σε μείγμα μετάλλων (Pb & Cd) σε προηγούμενη μελέτη από τους Kadukova *et al.* [57].

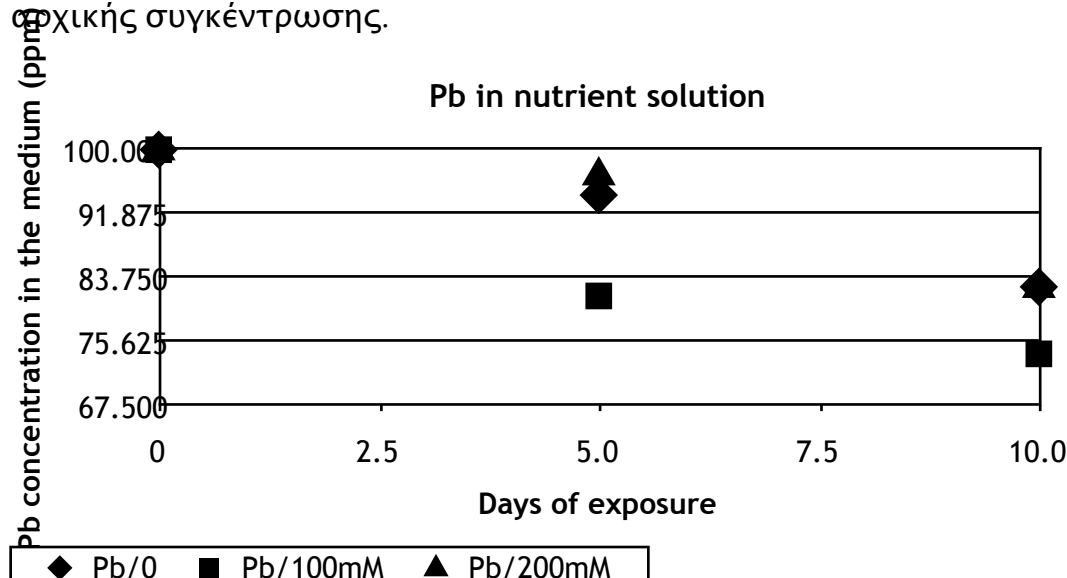
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι ένας τρόπος εκτίμησης της κινητικότητας των μετάλλων στο φυτό, είναι ο υπολογισμός του λόγου της συγκέντρωσης του μετάλλου στο υπέργειο τμήμα αυτού προς την συγκέντρωσή του στη ρίζα (leaf/root ratio). Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός, τόσο περισσότερο ενδείκνυται το φυτό για φυτοεξαγωγή. Ωστόσο, μια τέτοια εκτίμηση με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία θα οδηγούσε σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Ο μηχανισμός της προσρόφησης προκάλεσε πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση καδμίου στο ριζικό σύστημα του φυτού σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε στους βλαστούς του, όπως ακριβώς συνέβη και στην περίπτωση του μολύβδου.



Γράφημα 7.6. Συγκέντρωση του καδμίου (ppm) στο ριζικό σύστημα του *Tamarix Smyrnensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

7.3. Μελέτη συγκέντρωσης μολύβδου (Pb) στο θρεπτικό διάλυμα

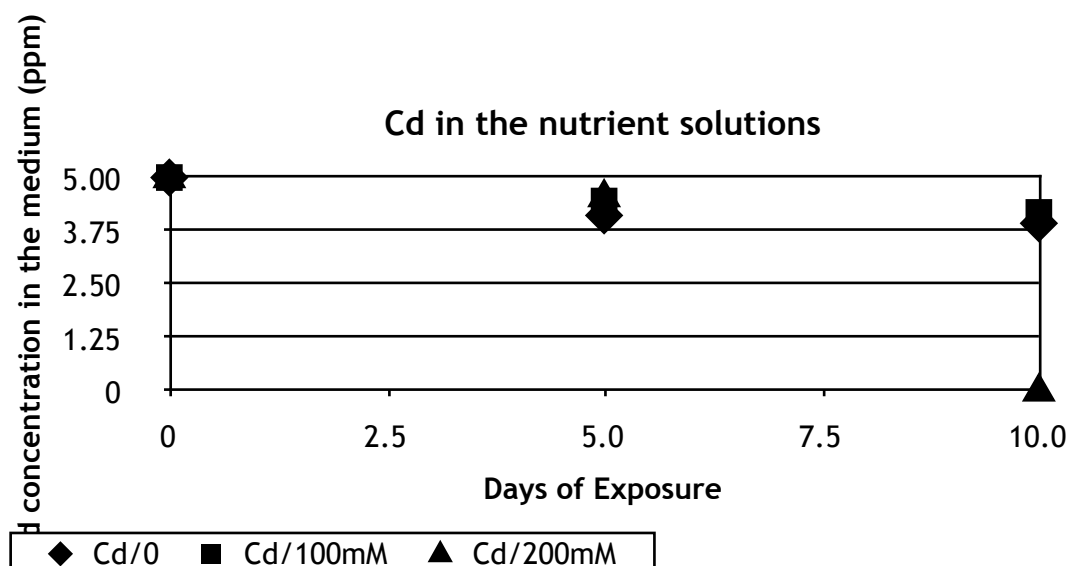
Στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζεται η πορεία της συγκέντρωσης του μολύβδου στο θρεπτικό διάλυμα κατά την διάρκεια των δέκα ημερών που διήρκεσε η υδροπονική του καλλιέργεια. Η μείωση φαίνεται να είναι σημαντική, αφού από 100 ppm που ήταν η αρχική δοθείσα συγκέντρωση του μολύβδου, όταν το *Tamarix Smyrnensis* εκτέθηκε σε συνθήκες αλατότητας 100 mM κατάφερε να την μειώσει στην τιμή των 81.44 ppm τις πέντε πρώτες μέρες και μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας στην τιμή των 74.09 ppm, μείωση που αγγίζει τελικά το 26%. Μείωση εξίσου σημαντική, αν και λίγο μικρότερη, παρουσιάζεται και στο θρεπτικό διάλυμα των φυτών στα οποία η αλατότητα ήταν μηδενική και συγκέντρωσης 200 mM. Σε αυτές τις ομάδες, που είχαν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά, η συγκέντρωση του μολύβδου μειώθηκε μέσα σε πέντε μέρες από την τιμή των 100 ppm στην τιμή των 95 ppm, ενώ μέχρι το τέλος των δέκα ημερών η τιμή της συγκέντρωσης του μολύβδου και για τις δύο περιπτώσεις έφτασε περίπου τα 82 ppm, μείωση περίπου 17.4% της αρχικής συγκέντρωσης.



Διάγραμμα 7.1. Συγκέντρωση μολύβδου (Pb) στο θρεπτικό διάλυμα.

7.4. Μελέτη συγκέντρωσης καδμίου (Cd) στο θρεπτικό διάλυμα

Η πρόσληψη καδμίου από το *Tamarix Smyrnensis* προκάλεσε μείωση στην συγκέντρωση του καδμίου στο θρεπτικό διάλυμα που τροφοδοτούσε τα φυτά κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η συγκέντρωση του καδμίου σε συνθήκες μηδενικής αλατότητας μειώθηκε μέχρι την 5^η μέρα από τα 5 ppm, που ήταν η αρχική δοθείσα συγκέντρωση στα 4.1 ppm, ενώ τη 10^η μέρα η τιμή της συγκέντρωσης ήταν 3.9 ppm περίπου. Υπό αυτές τις συνθήκες, το ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης του καδμίου εμφάνισε την μεγαλύτερη τιμή (21.4%), ενώ σε συνθήκες αλατότητας συγκέντρωσης 100mM, αν και το ποσοστό μείωσης ήταν λίγο μικρότερο άγγιξε το 16.35%.



Διάγραμμα 7.2. Συγκέντρωση καδμίου (Cd) στο θρεπτικό διάλυμα.

Η μέγιστη μείωση στην συγκέντρωση του καδμίου που παρουσιάστηκε στην περίπτωση που η συγκέντρωση της

αλατότητας ήταν μηδενική, πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι στα φυτά των ομάδων Cd/100 και Cd/200, επήλθε πιο νωρίς ο θάνατος σε σχέση με αυτά της ομάδας Cd/0, λόγω της πιο έντονης καταπόνησης που υπέστησαν, με αποτέλεσμα να σταματήσει η πρόσληψη του μετάλλου από αυτά πριν λήξει το πείραμα. Επίσης, η μείωση αυτή μπορεί αν οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκέντρωση του καδμίου στις ρίζες του φυτού όταν αναπτυσσόταν σε συνθήκες μηδενικής αλατότητας ήταν πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες ομάδες φυτών που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες αλατότητας 100 mM και 200 mM αντίστοιχα.

Από το Διάγραμμα 2.2 φαίνεται επίσης ότι στο θρεπτικό διάλυμα των φυτών στα οποία προστέθηκε NaCl συγκέντρωσης 200 mM, προκλήθηκε μέχρι την πέμπτη μέρα περίπου ίδια μείωση στην συγκέντρωση του καδμίου σε σχέση με αυτά στα οποία προστέθηκε NaCl συγκέντρωσης 100 mM. Η μεγαλύτερη των 100 mM συγκέντρωση NaCl δηλαδή, ενώ φαίνεται να βοήθησε στην επιπλέον μεταφορά του μετάλλου και συσσώρευσή του στο υπέργειο τμήμα του φυτού (βλ. Παράγραφο 7.2), εξετάζοντας την επίδραση που είχε σε ολόκληρο το φυτό (υπέργειο τμήμα και ριζικό σύστημα) διαπιστώνει ότι δεν φαίνεται να επηρέασε ιδιαίτερα την συνολική μείωση και απομάκρυνση του καδμίου από το θρεπτικό διάλυμα.

7.5. Μελέτη ρυθμού έκκρισης μολύβδου (Pb) και καδμίου (Cd) από τους αλατούχους αδένες των φύλλων του *Tamarix Smyrnensis*

Ένας από τους μηχανισμούς που ενεργοποιούν ορισμένα είδη φυτών, προσπαθώντας να αντεπεξέλθουν σε έντονες συνθήκες αλατότητας, είναι η έκκριση του NaCl από τους αλατούχους αδένες που εντοπίζονται στην επιφάνεια των φύλλων τους . Στην συγκεκριμένη μελέτη, οπτική παρατήρηση στα φύλλα των φυτών που συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία, ενίσχυε την υπόθεση ότι αυτός ο μηχανισμός λειτουργεί. Μάλιστα, στις ομάδες των φυτών στις οποίες είχε προστεθεί NaCl σε μεγαλύτερη συγκέντρωση, οι κρύσταλλοι άλατος ήταν ακόμα πιο ορατοί από τις υπόλοιπες ομάδες, μιας και η μεγαλύτερης συγκέντρωσης αλατότητα προκαλεί μεγαλύτερη πρόσληψη άλατος από φυτό άρα και μεγαλύτερο ρυθμό έκκρισης των αλάτων από αυτό (βλ. Εικόνα 7.1).



Εικόνα 7.1. Παρατήρηση κρυστάλλων άλατος που εκκρίνονται από τους αλατούχους αδένες του φυτού *Tamarix Smyrnenensis* σε διαφορετικές συνθήκες αλατότητας (0mM, 100mM και 200mM) κατά τη διάρκεια υδροπονικής του καλλιέργειας. Η λήψη της φωτογραφίας πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας με ψηφιακή μηχανή Canon Powershot A620.

Οι Hagemeyer και Waisel διαπίστωσαν ότι οι αδένες των φυτών του γένους *Tamarix* δεν είναι ιδιαίτερα επιλεκτικοί στα ιόντα που εκκρίνουν. Μάλιστα, βρέθηκε ότι μέσω των αλατούχων αυτών αδένων τα ιόντα που αναμένεται να εκκριθούν δεν είναι μόνο ιόντα Na^+ και Cl^- , αλλά σχετίζονται άμεσα με τις συνθήκες που επικρατούν στο ριζικό περιβάλλον του φυτού [51]. Σε προηγούμενη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο *Tamarix Smyrnenensis* σε συνθήκες πεδίου, διαπιστώθηκε ότι όταν το φυτό καλλιεργήθηκε παρουσία καδμίου και διαβαθμισμένης αλατότητας, εμφάνισε υψηλότερη συγκέντρωση μετάλλου στην επιφάνεια των φύλλων του όταν η αλατότητα αυξήθηκε [].

Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν την υπόθεση ότι το συγκεκριμένο φυτό κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποίησε σαν μηχανισμό αποτοξίνωσης, τόσο από την αλατότητα όσο και από τον μόλυβδο και το κάδμιο, την έκκριση αυτών από τους αλατούχους αδένες του. Πιθανολογείται επίσης, ότι όταν το φυτό εκτέθηκε σε υψηλότερη συγκέντρωση NaCl , η έκκριση

των μετάλλων αυξήθηκε. Ωστόσο, το πεδίο αυτό απαιτεί περαιτέρω έρευνα που θα έχει ως στόχο την εύρεση μεθόδων οι οποίες να μπορούν να επιβεβαιώσουν την λειτουργία του μηχανισμού αυτού και να προσδιορίσουν τον ρυθμό με τον οποίο το *Tamarix Smyrnensis* εκκρίνει τα μέταλλα αυτά από τους αλατούχους αδένες του.

7.6. Φυσιολογική απόκριση του *Tamarix Smyrnensis* στους παράγοντες καταπόνησης (αλατότητα-βαρέα μέταλλα)

Η παρουσία παραγόντων καταπόνησης (π.χ. βαρέα μέταλλα, αλατότητα) στο περιβάλλον του φυτού, συνήθως επηρεάζει αρνητικά την φυσιολογική του ανάπτυξη. Συνήθεις επιπτώσεις του μολύβδου στα φυτά περιλαμβάνουν την μείωση της βιομάζας του φυτού και -τόσο του υπέργειου τμήματος όσο και του ριζικού του συστήματος-, την χλώρωση, την απαγόρευση βιοσύνθεσης της χλωροφύλλης, δυσλειτουργίες στην ενζυμική δραστηριότητα όπως και χρωμοσωμικές αλλοιώσεις [59]. Υψηλή συγκέντρωση καδμίου συνήθως προκαλεί στα φυτά μειωμένη ανάπτυξη (κυρίως μείωση του υπέργειου τμήματός του) ή ακόμη και θάνατο λόγω μειωμένης ενζυμικής δραστηριότητας, φωτοσύνθεσης και διαπνοής. Επιπλέον, σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι το κάδμιο δρα ανταγωνιστικά στην πρόσληψη και μεταφορά απαραίτητων στοιχείων όπως ο Cu και ο Zn και αντικαθίσταται αυτών σε ενζυμικές αντιδράσεις απαραίτητες για τη σύνθεση RNA, DNA και για τον μεταβολισμό πρωτεϊνών. Οπότε, η έλλειψη τέτοιων στοιχείων ίσως είναι μια λογική εξήγηση της πρόκλησης μείωσης της ανάπτυξης του φυτού παρουσία Cd (βλ. Κεφάλαιο 5).

Τα ιόντα Na^+ και Cl^- αυτά καθαυτά, παρουσιάζουν τοξικότητα. Παρουσία υψηλής συγκέντρωσης Na^+ παρουσιάζονται ανωμαλίες στην περατότητα των μεμβρανών και παρεμπόδιση ενζύμων. Γενικώς, κάνουν την εμφάνισή τους δυσλειτουργίες στην αφομοίωση του άνθρακα (λόγω παρεμπόδισης της φωτοσυνθετικής λειτουργίας, αλλά και επιτάχυνσης της αναπνευστικής δραστηριότητας ώστε να αντισταθμιστεί το ενεργειακό κόστος αποκλεισμού των ιόντων ή σύνθεσης νέων μεταβολιτών, ενώ επιβραδύνεται η ανάπτυξη των

ευαίσθητων φυτικών ειδών. Εκτός αυτών, εμφανίζονται δυσχέρειες ως προς την πρόσληψη και μεταφορά του νερού και απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων.

Ωστόσο, το φυτό *Tamarix Smyrnensis* υπερέχει άλλων φυτών εξαιτίας ορισμένων χαρακτηριστικών που διαθέτει, τα οποία του δίνουν την δυνατότητα να αντιμετωπίζει με διάφορους μηχανισμούς που ενεργοποιεί, την έκθεσή του σε παράγοντες καταπόνησης. Η φυσιογνωμία του και η πορεία ανάπτυξής του υπό την επίδραση του μολύβδου, του καδμίου, αλλά και της αλατότητας παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

7.6.1. Υπολογισμός ξηρής βιομάζας φυτών

Από την 5^η κιόλας μέρα της πειραματικής διαδικασίας, οι ομάδες των φυτών στα οποία η αλατότητα είχε την μέγιστη τιμή (0/200, Pb/200 και Cd/200), εμφάνισαν ξηρά φύλλα στο κάτω μέρος του υπέργειου τμήματος, γεγονός που αποτελεί σύμπτωμα της αυξημένης αλατότητας στην οποία εκτέθηκαν. Τα φυτά αυτά, ήταν εμφανώς πιο αδύναμα, η διάμετρος του βλαστού τους ήταν μικρότερη και το φύλλωμά τους ήταν πολύ πιο φτωχό από τα υπόλοιπα φυτά. Ίδια συμπτώματα μικρότερης όμως έκτασης παρουσιάστηκαν και στα φυτά που εκτέθηκαν σε μικρότερη συγκέντρωση αλατότητας (0/100, Pb/100 και Cd/100).

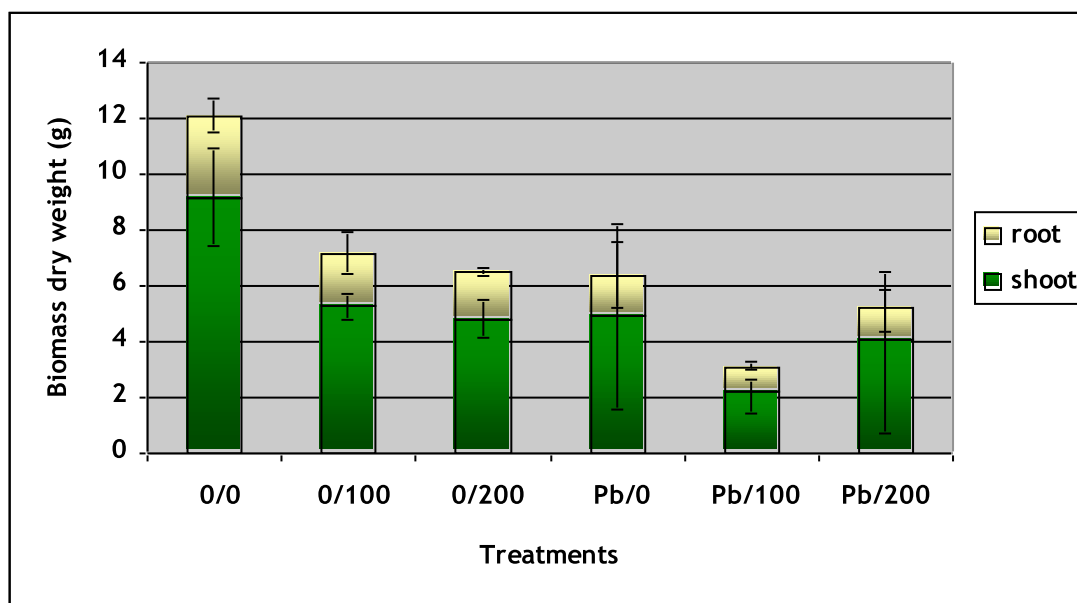
Οπτική παρατήρηση στο ριζικό σύστημα των φυτών έδειξε ότι εκτός από την ομάδα ελέγχου στην οποία δεν είχε προστεθεί NaCl (0/0) και η οποία παρουσίαζε υγιέστατο ριζικό σύστημα συνεχώς αναπτυσσόμενο, όλα τα υπόλοιπα φυτά εμφάνιζαν καταπονημένο και εύθραυστο ριζικό σύστημα. Συγκεκριμένα, στις ομάδες των φυτών στις οποίες είχε προστεθεί μόλυβδος, το χρώμα των ριζών τους ήταν σκούρο καφέ, το οποίο αποτελεί σύμπτωμα τοξικότητας από την παρουσία του μετάλλου και η βιομάζα τους μειωμένη [52]. Σύμφωνα με τον Xiong, η μειωμένη βιομάζα που παρουσίαζαν οι ρίζες φυτών που εκτέθηκαν σε συγκέντρωση μολύβδου οφείλεται στην απόθεση του μετάλλου στα κυτταρικά τοιχώματα η οποία μεταβάλλει την ελαστικότητά τους [60].

Παρά τα συμπτώματα τοξικότητας που εμφανίστηκαν στις ομάδες των φυτών στις οποίες προστέθηκε μόλυβδος, οι τελευταίες κατάφεραν να επιζήσουν μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Αντίθετα, η ποσότητα του καδμίου που προστέθηκε στις υπόλοιπες ομάδες φυτών αποδείχθηκε αρκετά υψηλή με

αποτέλεσμα να προκαλέσει τόσο έντονα συμπτώματα τοξικότητας που οδήγησαν στον θάνατο όλων των φυτών αυτών των ομάδων ανεξαρτήτου συγκέντρωσης NaCl πριν το τέλος της πειραματικής διαδικασίας.

Οι τρεις πρώτες στήλες του Γραφήματος 7.8 παρουσιάζουν την επίδραση που είχαν διαφορετικές συνθήκες αλατότητας στην βιομάζα των φυτών των ομάδων ελέγχου (0/0, 0/100, 0/200), ενώ οι τρεις επόμενες (Pb/0, Pb/100, Pb/200) φανερώνουν την επίδραση που είχε επίσης στην βιομάζα του φυτού η αύξηση της συγκέντρωσης της αλατότητας σε συνδυασμό με την προσθήκη του μολύβδου στο θρεπτικό διάλυμα.

Παρατηρώντας κανείς στο Γράφημα 7.8 την βιομάζα των φυτών των ομάδων ελέγχου, διαπιστώνει την ύπαρξη ενός συσχετισμού μεταξύ της διαβαθμισμένης μείωσης αυτής και της συνεχόμενης αύξησης της συγκέντρωσης της αλατότητας. Στα πλαίσια αυτού του συσχετισμού κινήθηκαν και η ομάδες των φυτών τα οποία καλλιεργήθηκαν παρουσία μολύβδου, με εξαίρεση την ομάδα των φυτών στα οποία η συγκέντρωση της αλατότητας ήταν 100mM.

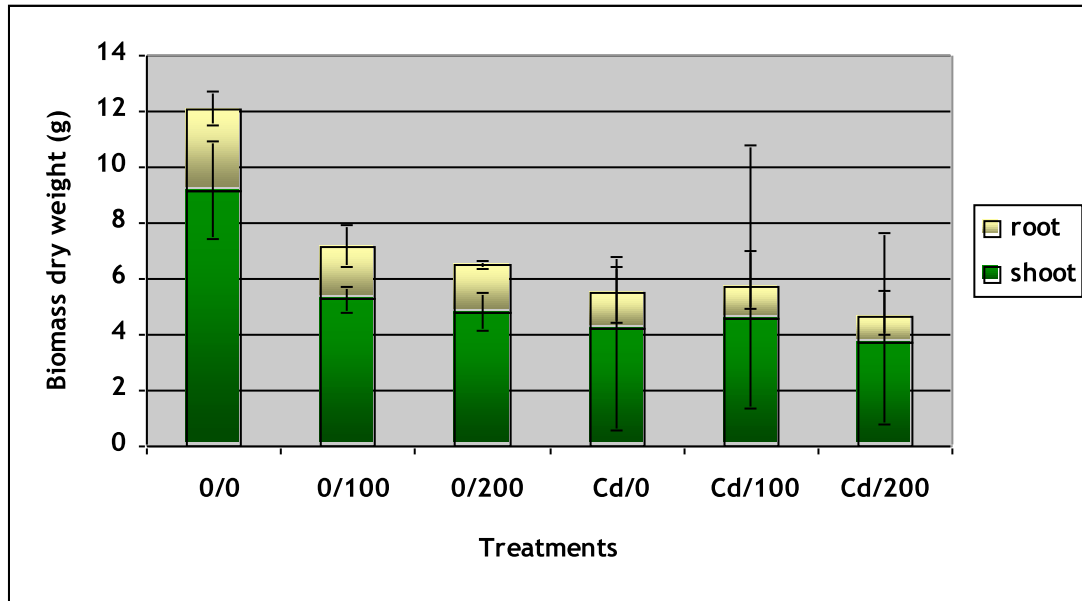


Γράφημα 7.8. Ξηρή βιομάζα των φυτών των ομάδων ελέγχου και των ομάδων στις οποίες έχει προστεθεί Pb. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Σε αντιστοιχία με το Γράφημα 7.8 βρίσκεται και το Γράφημα 7.9 που αφορά στην διακύμανση της βιομάζας των φυτών των ομάδων ελέγχου σε σύγκριση με τις ομάδες των φυτών στις οποίες προστέθηκε κάδμιο.

Οι τρεις πρώτες στήλες του Γραφήματος 2.7 παρουσιάζουν την επίδραση που είχαν διαφορετικές συνθήκες αλατότητας στην βιομάζα των φυτών των ομάδων ελέγχου, ενώ οι τρεις επόμενες φανερώνουν την επίδραση που είχε επίσης στην βιομάζα του φυτού η αύξηση της συγκέντρωσης της αλατότητας σε συνδυασμό με την προσθήκη του καδμίου στο θρεπτικό διάλυμα.

Όμοια με την επίδραση που είχε το NaCl στη βιομάζα των φυτών στα οποία προστέθηκε μόλυβδος φαίνεται να κινήθηκε και αυτή των φυτών που ανπτύσσονταν υπό την παρουσία του καδμίου, με εξαίρεση την ομάδα Cd/100.

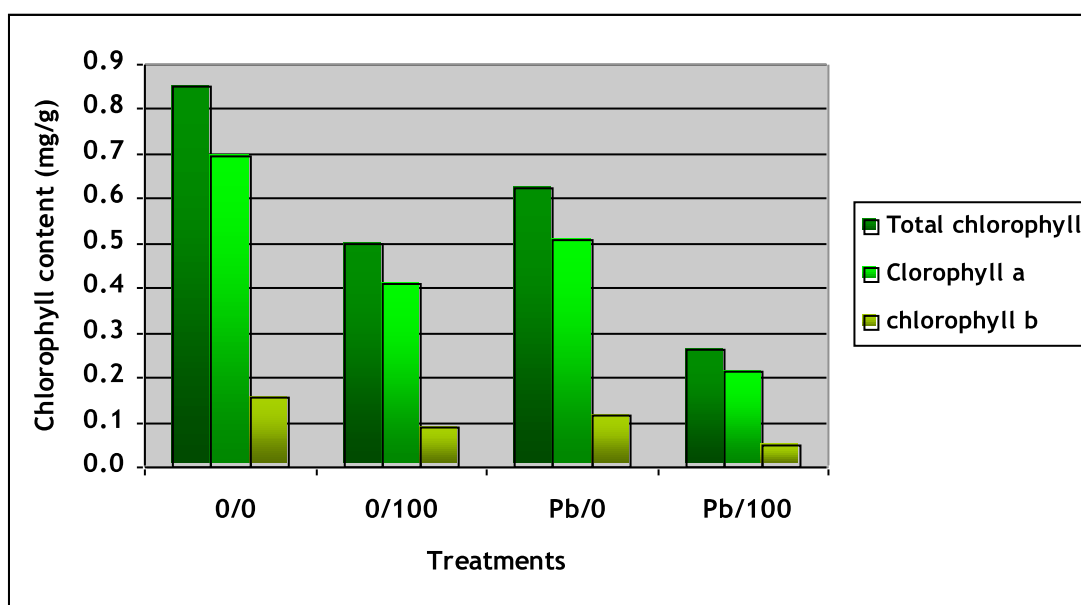


Γράφημα 7.9. Ξηρή βιομάζα των φυτών των ομάδων ελέγχου και των ομάδων στις οποίες έχει προστεθεί Cd. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

7.6.2. Εκτίμηση χλωροφύλλης

Μετά την λήξη του πειράματος, τα περισσότερα φυτά που συμμετείχαν σε αυτό, είχαν καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε η μέτρηση της χλωροφύλλης σε αυτά να είναι απαγορευτική. Η μέτρηση της χλωροφύλλης που πραγματοποιήθηκε στις ομάδες ελέγχου και στις ομάδες στις οποίες είχε προστεθεί μόλυβδος -πλην των φυτών στα οποία η αλατότητα συγκέντρωσης 200mM τα είχε καταπονήσει σε έντονο βαθμό (0/200, Pb/200), αποκάλυψε ότι εκτός από την αρνητική επίδραση που παρουσίασαν οι παράγοντες καταπόνησης στην βιομάζα τους, οι ίδιοι φαίνεται να μείωσαν και τα επίπεδα της φωτοσύνθεσης.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε διαφωνία με προγενέστερες μελέτες πάνω στο ίδιο φυτό σε συνθήκες πεδίου, στις οποίες φάνηκε ότι η συνολική χλωροφύλλη, η χλωροφύλλη a, αλλά και η χλωροφύλλη b, δεν παρουσίασαν καμία μείωση όταν το *Tamarix Smyrnenensis* εκτέθηκε σε συγκεντρώσεις μολύβδου ή καδμίου, παρουσία περίπου ίδιων συγκεντρώσεων NaCl [51], [52].



Γράφημα 7.10. Συγκέντρωση χλωροφύλλης του *Tamarix Smyrnensis* έπειτα από έκθεσή του σε μόλυβδό (Pb) και χλωριούχο νάτριο (NaCl).

7.6.3. Υπολογισμός Βαθμού Περιορισμού Ανάπτυξης (*Grade of Growth Inhibition*)

Μία από τις μεθόδους υπολογισμού της επίδρασης διαφόρων παραγόντων καταπόνησης στην ανάπτυξη του φυτού είναι η χρήση του τεστ φυτοτοξικότητας [52]. Στα πλαίσια του τεστ αυτού υπολογίστηκε ο Βαθμός Περιορισμού Ανάπτυξης (*Grade of Growth Inhibition*), ο οποίος παρουσιάζεται στους ακόλουθους πίνακες. Οι πίνακες αυτοί που θέτουν ως κριτήριο την επίδραση του μολύβδου, του καδμίου ή και της συνέργειας της αλατότητας με ένα εκ των δύο μετάλλων κάθε φορά σε σχέση με τις ομάδες ελέγχου (*control groups*).

Ο τύπος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του GGI είναι η εξής:

$$GGI = ((C-T)/C) * 100$$

Όπου:

C: Ξηρό βάρος της βιομάζας του φυτικού ιστού στις ομάδες ελέγχου (g).

T: Ξηρό βάρος της βιομάζας του φυτικού ιστού στις ομάδες των φυτών που έχει προστεθεί ένα από τα δύο μέταλλα (g).

Ο GGI για παράδειγμα της ομάδας ελέγχου στην οποία δεν έχει προστεθεί ούτε NaCl ούτε κάποια ποσότητα βαρέως μετάλλου ισούται με μηδέν εφόσον η ομάδα αυτή θεωρείται ότι παρουσιάζει φυσιολογική ανάπτυξη. Όσο μεγαλύτερος είναι δηλαδή ο GGI τόσο μεγαλύτερη είναι η καταπόνηση που έχει υποστεί το φυτό. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλους τους πίνακες που ακολουθούν παρατίθεται εκτός από τον GGI ολόκληρου του φυτού

και αυτός του υπέργειου τμήματός του, ο οποίος εμφανίζει παντού τιμές ανάλογες του πρώτου.

Φαίνεται λοιπόν από τις τιμές του GGI στο Πίνακα 7.1 και 7.2 ότι τόσο ο μόλυβδος όσο και το κάδμιο επέδρασαν καταλυτικά στην βιομάζα του φυτού όταν αυτό αναπτύχθηκε χωρίς την παρουσία NaCl, παρουσιάζοντας GGI 47% και 55% για κάθε μέταλλο αντίστοιχα.

Αντιθέτως, σε συνθήκες αλατότητας 100 mM και 200mM, η παρουσία τόσο του μολύβδου όσο και του καδμίου φαίνεται ότι επηρέασε αρκετά λιγότερο την φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού (εξαιρώντας την πορεία ανάπτυξης των φυτών της ομάδας Pb/100).

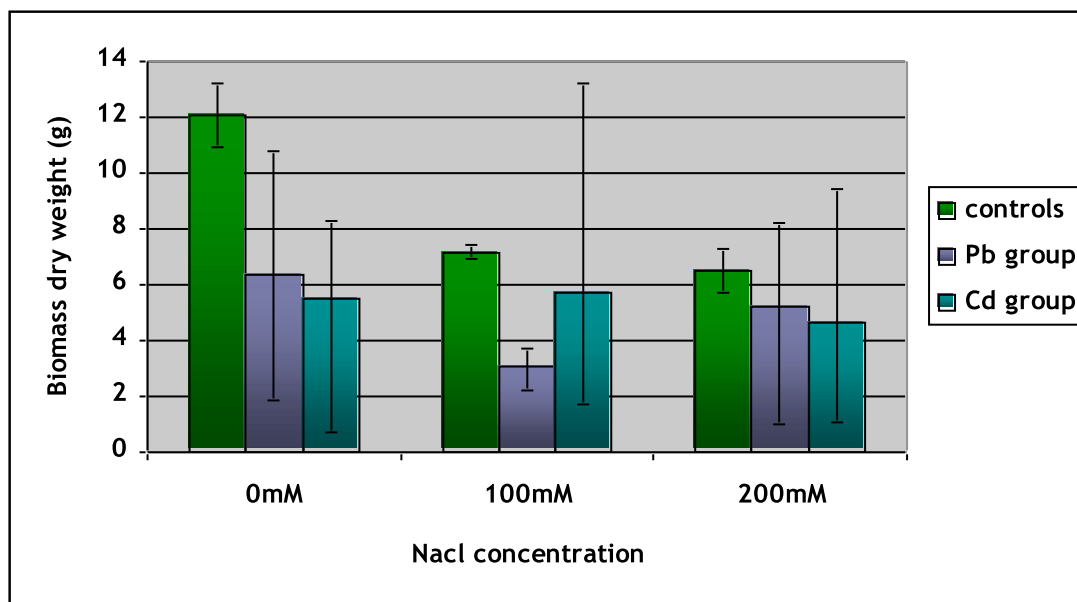
Πίνακας 7.1. Επίδραση Pb στην ανάπτυξη του <i>Tamarix</i>							
<i>Smyrnensis</i>							
Control groups			Pb Treatments			GGI (%)	
Code	C		Code	T			
name	Shoots	Plant	name	Shoots	Plant	Shoots	Plant
0/0	9.1773	12.0794	Pb/0	4.9621	6.3685	45.9311	47.2785
0	5.2673	7.1652	Pb/100	2.2030	3.0903	58.1757	56.8705
0	4.8213	6.4976	Pb/200	4.0485	5.2086	16.0275	19.8392

Πίνακας 7.2. Επίδραση Cd στην ανάπτυξη του <i>Tamarix Smyrnensis</i>							
Control groups			Cd Treatments			GGI (%)	
Code	C		Code	T			
name	Shoots	Plant	name	Shoots	Plant	Shoots	Plant
0/0	9.1773	12.0794	Cd /0	4.2404	5.5002	53.7946	54.4662
0	5.2673	7.1652	Cd/100	4.5502	5.7414	13.6156	19.8711
0	4.8213	6.4976	Cd/200	3.7482	4.6583	22.2568	28.3074

Στα παραπάνω συμπεράσματα μπορεί να καταλήξει κανείς μελετώντας και το γράφημα που ακολουθεί, το οποίο απεικονίζει γραφικά την επίδραση του μολύβδου και του καδμίου στην βιομάζα του *Tamarix Smyrnensis* σε σχέση με τις ομάδες ελέγχου (Γράφημα 7.11).

Η μικρότερη λοιπόν επίδραση και των δύο μετάλλων στην βιομάζα του φυτού, όταν αυτό αναπτύσσεται σε συνθήκες αλατότητας

έρχεται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν πάνω στο ίδιο φυτό, στις οποίες διαπιστώθηκε ότι η έκκριση μετάλλων αυξάνεται όταν υφίσταται μεγαλύτερη έκκριση αλάτων από τους αλατούχους αδένες που εντοπίζονται στην επιφάνεια των φύλλων του φυτού [62]. Ο μηχανισμός αυτός αποτοξίνωσης ίσως δηλαδή ελαχιστοποιεί τα συμπτώματα της καταπόνησης του φυτού λόγω τοξικότητας, ένα εκ των οποίων είναι και η μείωση της βιομάζας του.



Γράφημα 7.11. Γραφική απεικόνιση της επίδρασης Pb και Cd στην βιομάζα του *Tamarix Smyrnensis* σε σχέση με τις ομάδες ελέγχου. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσοι όροι ($n=2$ για τις ομάδες ελέγχου και $n=3$ για τις υπόλοιπες ομάδες) με ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αποκατάσταση ρυπασμένων από βαρέα μέταλλα εδαφών με χρήση φυτών, αποτελεί μια καινοτόμο συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία, η οποία αντιπαραβάλλεται στις συμβατικές μεθόδους αποκατάστασης. Στα πλαίσια του χαρακτηρισμού του μεσογειακού φυτού *Tamarix Smyrnensis* ως ικανού να απομακρύνει μόλυβδο και κάδμιο από ρυπασμένα εδάφη, πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη μελέτη.

Στην περίπτωση της ομάδας των φυτών που καλλιεργήθηκαν παρουσία μολύβδου, η προσθήκη μικρής συγκέντρωσης NaCl (100 mM) βοήθησε στην μεταφορά του μετάλλου και στη συσσώρευση του στο υπέργειο τμήμα των φυτών και συνέβαλε θετικά στην συνολική απομάκρυνση του Pb από το θρεπτικό διάλυμα. Επιπλέον, η προσθήκη συγκέντρωσης 200 mM αποδείχτηκε τοξική για τα φυτά που καλλιεργήθηκαν παρουσία αυτής, αφού οι αρνητικές συνέπειες της υψηλής συσσώρευσης στη χλωροφύλλη και στη βιομάζα ήταν εμφανείς.

Όσον αφορά την ομάδα των φυτών που καλλιεργήθηκαν παρουσία καδμίου, παρά το γεγονός ότι η συγκέντρωση NaCl όταν αυξήθηκε από 100 σε 200 mM, σχεδόν τετραπλασίασε την συγκέντρωση και την συνολική συσσώρευση του μετάλλου στο υπέργειο τμήμα τους σε σχέση με την περίπτωση που τα φυτά καλλιεργήθηκαν σε συνθήκες μηδενικής αλατότητας, η καταπόνηση που υπέστησαν τα φυτά της ομάδας αυτής από την ενέργεια των δύο παραγόντων ήταν τόσο σφοδρή που προκάλεσε τον θάνατό τους πριν τη λήξη της πειραματικής διαδικασίας.

Οι ρίζες αποτέλεσαν το τμήμα του φυτού στο οποίο παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση τόσο μολύβδου όσο και καδμίου, γεγονός που οφείλεται όμως κυρίως στην δράση του μηχανισμού της προσρόφησης.

Ο μηχανισμός αποτοξίνωσης που φαίνεται να διαθέτει το *Tamarix Smyrnensis*, σχετίζεται με την έκκριση αλάτων και πιθανώς βαρέων μετάλλων από τους αλατούχους αδένες οι οποίοι τοποθετούνται στην επιφάνεια των φύλλων των φυτών. Μέσω αυτού του μηχανισμού που φαίνεται να ενεργοποιεί το *Tamarix Smyrnensis* όταν εκτίθεται σε καταπονήσεις, καταφέρει να αμύνεται των καταπονήσεων αυτών που του προκαλούν τα βαρέα μέταλλα και η αλατότητα, αποκλείοντάς τα στο εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, το πεδίο αυτό απαιτεί περαιτέρω έρευνα που θα θέσει ως στόχο την εύρεση μεθόδων οι οποίες να μπορούν να προσδιορίσουν τον ρυθμό με τον οποίο το *Tamarix Smyrnensis* εκκρίνει τα μέταλλα αυτά από τους αλατούχους αδένες του και τον τρόπο με τον οποίο θα συλλέγονται αυτά σε μελλοντική εφαρμογή του φυτού σε σύστημα φυτοεξαγωγής.

Εν κατακλείδι, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υδροπονική καλλιέργεια του *Tamarix Smyrnensis*, διαπιστώθηκε ότι παρόλο που το φυτό αυτό δεν είναι υπερσυσσωρευτής των υπό εξέταση μετάλλων συσσωρεύει αρκετά μεγάλες ποσότητες αυτών στον φυτικό του ιστό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υπερσυσσωρευτές μολύβδου και καδμίου που έχουν ως τώρα αναγνωριστεί είναι μικρά φυτά με μεγάλη παραγωγή βιομάζας, η ικανότητα του *Tamarix Smyrnensis* να παράγει μεγάλη βιομάζα και να αναπτύσσεται σε μεγάλη ποικιλία εδαφών το καθιστά ανταγωνίσιμο είδος άλλων υπερσυσσωρευτών που είθισται να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές φυτοεξυγίανσης μιας και η συνολική απομάκρυνση του

μολύδου και του καδμίου από το χώμα ενισχύεται λόγω της συνδυασμένης δράσης της συσσώρευσης και της έκκρισης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Daghan, H. (2004). 'Phytoextraction of Heavy Metal from Contaminated Soils Using Genetically Modified Plants'. Aachen Hochschulbibliothek <<http://www.bth.rwth-aachen.de>> .
- [2] Uveges, J.L, Corbett, A.L., Mal, T.K., (2002). 'Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife)'. *Environmental Pollution*, Vol.120, pp. 319-323.
- [3] Das, P., Samantaray, S., Rout, G.R., (1997). 'Studies on cadmium toxicity in plants: a review'. *Environmental Pollution*, Vol. 98, Issue No. 1, pp. 29-36.
- [4] Lasat, M.M. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. Grant No. CX 824823 awarded by the U.S. Environmental Protection Agency.
- [5] Hartman, W.J, Jr. (1975). 'An evaluation of land treatment of municipal wastewater and physical siting of facility installations', Washington D.C., U.S. Department of Army.
- [6] Schnoor, J. L., Licht, L. A., Mc Cutheon, S. C., Wolfe, N. L., and Carreira, L. H. (1995). 'Phytoremediation of organic and nutrient contaminants'. *Environmental. Science and Technology*, Vol. 29, pp. 318A-323A.
- [7] National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268.
- [8] Miller, P. G., (1996). 'Phytoremediation, Technology Overview Report', Ground Water Remediation Technologies Analysis Center.
- [9] Raskin, I., Salt, D., Kramer, U., and Schulman, R. (1998). 'Phytoremediation: Green and Clean'. *Acta Horticulturae*, Vol. 457, pp. 329-331.
- [10] Cunningham, S.D., Berti W.R. (1993). 'Remediation of contaminated soils with green plants: an overview'. *In Vitro Cellular and Developmental Biology*, Vol. 29, pp. 207-212.
- [11] Glass, D.J. (1999a). 'Economic potential of phytoremediation. In *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*, pp. 15-31, John Wiley & Sons Inc, New York, NY.
- [12] Glass, D.J. (1999b). 'U.S. and International Markets for Phytoremediation. 1999-2000'. D. Glass Assoc Inc, Needham, MA.
- [13] Gabriel, P.F. (1992). 'Innovative technologies for contaminated soil remediation: focus on bioremediation'. In *Bioremediation: the state of practise in Hazardous waste remediation operations: AWMA/HWAC*.
- [14] Chappell, J. (1997). 'Phytoremediation of TCE in groundwater using *Populus*'. United States E.P.A. Technology Innovation Office <<http://clu-in.org>>.

- [15] Brennan, M. A., and Shelley, M. L. (1999). 'A model of uptake, translocation and accumulation of lead by maize for the purpose of phytoextraction'. *Ecological Engineering*, Vol. 12, pp. 271-297.
- [16] Lasat, M.M. (2000). 'Phytoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues', *Journal of Hazardous Substance Research*, Vol.2, pp. 1-25.
- [17] Suresh, B., and Ravishankar, G.A. (2004). Phytoremediation - A Novel and Promising Approach for Environmental Clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*, Vol. 24, pp. 97-124.
- [18] Macek, T., Mackova, M., Ka, J. (2000). 'Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation'. *Biotechnology Advances*, Vol.18, Issue No 1, pp. 23-34.
- [19] Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group, Phytoremediation Work Team (1999). 'Decision tree'.
- [20] Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L.Q (2006). 'Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site'. *Science of the Total Environment*, Vol. 368, pp. 456-464.
- [21] Lasat, M.M. (2002). 'Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms', *Journal of Environmental Quality*, Vol. 31, Issue No 1, pp. 109-120.
- [22] Salt, D. E., Smith, R. D., Raskin, I. (1998). 'Phytoremediation'. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Vol. 49, pp. 643-668.
- [23] Huang, J.W., and Cunningham, S.D. (1996). 'Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation', *New Phytology*, Vol. 134, pp. 75-84.
- [24] Gardea-Torresdey, J.L., Peralta-Videa, J.R., de la Rosa, G., Parsons, J.G. (2005). 'Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy'. *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 249, pp. 1797-1810.
- [25] Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group (2001). 'Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document'.
- [26] Watanabe, M. E. (1997). 'Phytoremediation on the brink of commercialization'. *Environmental Science and Technology*, Vol. 31, pp. 182A-186A.
- [27] Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., Baker, A.M., (1995b). 'Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution'. *Soil Science Society of America journal*, Vol.59, pp. 125-133.
- [28] Ζαμπετάκης, Λ. (2002), 'Αποκατάσταση εδαφών δια της μεθόδου της φυτοεξυγίανσης, παρουσίαση μαθηματικού μοντέλου για την πρόσληψη ξενοβιοτικών ουσιών από φυτά'. Πτυχιακή διατριβή.
- [29] Αναγνωστόπουλος, Α. (1985). 'Η ρύπανση του περιβάλλοντος', Εκδ. Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη.

- [30] New Jersey Department of Environmental Protection (NJDEP) (1996). 'Soil Cleanup Criteria. Proposed Cleanup Standards for Contaminated Sites'.
- [31] Βαλκανάς, Γ. (1992). 'Ρύπανση περιβάλλοντος. Επιστήμη και τεχνική αντιμετώπισης', Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα.
- [32] Irwin, R.J., Van Mouwerik, M., Stevens, L., Seese, M.D., Basham, W. (1997). 'Environmental Contaminants Encyclopedia', Fort Collins, Colorado.
- [33] Οικονομόπουλος, Α. (1999). 'Χημεία και έλεγχος ρύπανσης της ατμόσφαιρας', Πανεπιστημιακές παραδόσεις.
- [34] Nordic council of ministers (2003). 'Lead review', Issue no. 04.
- [35] World Health Organisation Regional Office for Europe (2000). 'Air Quality Guidelines', Chapter 6.3. <<http://www.euro.who.int>>.
- [36] IPCS intoxic databank International programme on chemical safety, Environmental health criteria, cadmium environmental aspects <<http://www.inchem.org>>.
- [37] Hopkins, W.G., 'Introduction to plant physiology', John Wiley & Sons Inc, New York, NY.
- [38] <www.britannica.com>
- [39] Τσέκος,Ι., και Κουκόλη Ε. (1989). 'Βοτανική, η οργάνωση του φυτικού σώματος', Αφοι Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- [40] Δροσσόπουλος, Ι. Β. (1992). 'Ανόργανη Διατροφή Φυτών', Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- [41] Davidson, M.W., Florida State University , <micro.magnet.fsu.edu>.
- [42] Καραμπουρνιώτης,, Γ. (2003). 'Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών. Οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες', Εκδ. Έμβρυο.
- [43] Clemens, S. (2001). 'Moleccular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis', *Planta*, Vol. 212, pp. 475-486.
- [44] Cobbett, C. (2002). 'Phytochelatin and Metallothioneins: Roles in heavy metal Detoxification and Homeostasis', *Annual Review to Plant Biology*, Vol. 53, pp.159-82.
- [45] Zenk MH (1996). 'Heavy metal detoxification in higher plants - a review. *Gene*, Vol.179, pp. 21-30.
- [46] Hall, J.L. (2002). 'Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance'. *Journal of Experimental Botany*, Vol.53, pp.1-11.
- [47] Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture (USDA), <<http://www.usda.gov>> .
- [48] Global Invasive Species Database, <<http://www.issg.org>> .

- [49] Harborne, J.B. (1984) *Phytochemical Methods*, Second Edition, London, pp. 214 - 219.
- [50] Soon Y. (1998). 'Determination of cadmium, chromium, cobalt, lead and nickel in plant tissue', *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, CRC Press, London, pp. 193-198.
- [51] Manousaki, E., Kadukova, J., Papadantonakis, N., Kalogerakis, N., 'Phytoextraction and release of Cd by the leaves of *Tamarix Smyrnenensis* growing on contaminated non saline and saline environment'.
- [52] Kadukova, J., Kalogerakis, N. (2007). 'Lead accumulation from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnensis* Bunge', *European Journal of Soil Biology*, Vol.43, pp. 216-223.
- [53] Otte, M.L. (1991). 'Contamination of coastal wetlands with heavy metals: factors affecting uptake of heavy metals by salt marsh plants', Rozema, J., Verkleij, J.A.C. (Eds.), *Ecological Responses to Environmental Stresses*, Kluwer Academic.
- [54] Fitzgerald, E., J. Caffrey, S. Nesaratnam and P. McLoughlin (2003) 'Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland', *Environmental Pollution*, Vol. 123, pp. 67-74.
- [55] Sekhar, K. Ch., Kamala, C.T., Chary, N.S., Balaram, V., Garcia, G. (2005). Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils. *Chemosphere*, Vol.58, Issue 4, pp.507-514.
- [56] Dahmani-Muller, H., van Oort, F., Gealie, B., Balabane, M. (2000). 'Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter'. *Environmental Pollution*, Vol. 109, pp. 231-238.
- [57] Kadukova, J., Manousaki, E., Skoula, M., Naxakis, G., Kalogerakis, N. 'Pb and Cd uptake from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnensis*'. 3rd European Bioremediation Conference.
- [58] Hagemeyer J. and Y. Waisel (1988). 'Excretion of ions (Cd^{2+} , Li^{+} , Na^{+} and Cl^{-}) by *Tamarix aphylla*'. *Physiologia plantarum*, Vol. 73, pp. 541-546
- [59] Kadukova, J., Manousaki, E., Kalogerakis, N., 'Pb and Cd Accumulation and Excretion by Salt Glands of Salt Cedar (*Tamarix smyrnensis* Bunge)'.
- [60] Xiong, Z.T (1997). 'Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus oleraceus* L.', *Environmental Pollution*, Vol. 97, Issue No.3, pp. 275-279.
- [61] McGrath S.P., and Zhao F.J. (2003). 'Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils'. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 14, pp. 277-282.
- [62] Manousaki, E., Kadukova, J., Naxakis, G., Kalogerakis N. (2005). 'Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes Island, Greece.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Group	leaves(g)	stem in shoot(g)	root(g)	stem in root(g)	whole plant(g)
A	5.2231	7.5681	5.7022	0	18.4934
	9.4384	10.9969	3.5878	0	24.0231
B	2.2415	5.5721	4.6373	0	12.4509
	4.5190	10.3542	4.7890	0	19.6622
D	1.5235	0.2815	0.4033	0	2.2083
E	0.9988	1.3362	1.5217	0	3.8567
	1.2434	3.3596	1.9887	0	6.5917

Πίνακας 1 Φρέσκο βάρος της βιομάζας του φυτού *Tamarix Smyrnnensis*.

Group	leaves(g)	stem in shoot (g)	root(g)	stem in root (g)	whole plant (g)
A	3.1822	4.2172	1.2982	2.2149	10.9125
	5.0177	5.9375	1.3290	0.9622	13.2464
B	1.6478	3.1448	0.8551	1.7854	7.4331
	2.3264	3.4157	0.5038	0.6515	6.8974
C	1.2242	4.2562	0.3881	1.4257	7.2942
	1.5189	2.6433	0.5802	0.9587	5.7011
D	2.7429	5.4576	0.6648	1.9160	10.7813
	2.4513	2.6407	0.1986	1.1611	6.4517
	1.3623	0.2314	0.0415	0.2372	1.8724
E	1.3377	1.1908	0.1903	0.6261	3.3449
	0.7367	0.6957	0.2048	0.5736	2.2108
	0.9876	1.6606	0.3146	0.7525	3.7153
F	0.4457	0.2653	0.0496	0.2635	1.0241
	2.8268	2.7792	0.4384	0.3092	6.3536
	1.7576	4.0711	1.0952	1.3241	8.2480
G	3.3282	3.1153	0.3532	0.7076	7.5043
	0.3207	0.2160	0.1659		0.7026
	1.9920	3.7490	0.7203	1.8325	8.2938
H	5.3929	5.3686	1.0760	1.4064	13.2439
	0.6115	0.9350	0.3048	0.4136	2.2649
	0.4732	0.8623	0.3730		1.7085
J	1.2429	1.5530	0.1924	0.5116	3.4999
	2.2074	5.4254	0.8308	0.9653	9.4289
	0.4128	0.4032	0.2302		1.0462

Πίνακας 2. Ξηρό βάρος της βιομάζας του φυτού *Tamarix Smyrnnensis*.

MAICH 28/06/2007	SHOOTS	ROOTS
------------------	--------	-------

Group		Pb(ppm)	Cd(ppm)	Pb(ppm)	Cd(ppm)
1	A	2.740	0.509	31.000	0.735
2		1.770	0.387	12.700	0.374
3	B	1.150	0.175	14.400	0.341
4		2.630	0.307	13.800	0.227
5	C	1.790	0.382	14.200	0.321
6		1.470	0.238	30.400	1.630
7	D	42.900	0.321	37600.000	3.240
8		10.600	0.614	35600.000	1.710
9		620.000	0.591	33900.000	2.770
10	E	369.000	0.173	30200.000	4.050
11		294.000	0.245	28800.000	1.540
12		145.000	0.240	26000.000	5.900
13	F	307.000	0.295	14100.000	1.950
14		105.000	0.384	30600.000	4.400
15		17.900	0.225	13700.000	0.508
16	G	0.742	0.837	87.800	4490.000
17		2.380	21.100	107.000	3950.000
18		1.320	0.618	54.700	5130.000
19	H	1.820	2.200	25.100	417.000
20		1.220	12.000	26.300	232.000
21		1.320	21.400	68.900	294.000
22	J	0.497	45.900	35.400	278.000
23		0.127	9.420	2130.000	122.000
24		0.396	70.000	89.800	154.000

Πίνακας 3. Συγκέντρωση μολύβδου (Pb) και καδμίου (Cd) στο υπέργειο τμήμα και στο ριζικό σύστημα του φυτού *Tamarix Smyrnensis*.

MAICH 28/06/2007	SHOOTS		ROOTS	
Group	Pb(mg)	Cd(mg)	Pb(mg)	Cd(mg)

1	A	0.0203	0.1089	0.0038	0.0026
2		0.0194	0.0291	0.0042	0.0009
3	B	0.0055	0.0380	0.0008	0.0009
4		0.0151	0.0159	0.0018	0.0003
5	C	0.0098	0.0258	0.0021	0.0006
6		0.0061	0.0468	0.0010	0.0025
7	D	0.3518	97.0381	0.0026	0.0084
8		0.0540	48.4053	0.0031	0.0023
9		0.9881	9.4479	0.0009	0.0008
10	E	0.9330	24.6553	0.0004	0.0033
11		0.4211	22.4179	0.0004	0.0012
12		0.3840	27.7446	0.0006	0.0063
13	F	0.2183	4.4147	0.0002	0.0006
14		0.5886	22.8766	0.0022	0.0033
15		0.1043	33.1444	0.0013	0.0012
16	G	0.0048	0.0931	0.0054	4.7630
17		0.0013	0.0178	0.0113	0.6553
18		0.0076	0.1396	0.0035	13.0959
19	H	0.0196	0.0623	0.0237	1.0352
20		0.0019	0.0189	0.0186	0.1667
21		0.0018	0.0257	0.0286	0.1097
22	J	0.0014	0.0249	0.1283	0.1957
23		0.0010	3.8257	0.0719	0.2191
24		0.0003	0.0207	0.0571	0.0355

Πίνακας 4. Συνολική συσσώρευση μολύβδου (Pb) και καδμίου (Cd) στο υπέργειο τμήμα και στο ριζικό σύστημα του φυτού *Tamarix Smyrnensis*.

Chlorophyll absorbance				
Group	m(g)	mL	663nm	646nm
A	0.2002	16	0.6863	0.2561
	0.2000	16	0.8693	0.3281
B	0.2004	8	0.9202	0.3399
D	0.1996	16	0.7245	0.2769
	0.2008	8	0.8229	0.3061

E	0.2001	8	0.5127	0.1904
	0.2004	8	0.4508	0.1692

Πίνακας 5. Απορρόφηση χλωροφύλλης

group	plant Nr	day 0		day5		day 10	
		Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
A	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	4	98.5	0.0	89.4	0.0	88.2	0.0
	5	96.5	0.0	91.7	0.0	76.5	0.0
	6	102.0	0.0	98.8	0.0	80.6	0.0
E	7	135.0	0.0	104.0	0.0	94.2	0.0
	8	117.0	0.0	119.0	0.0	99.2	0.0
	9	144.0	0.0	99.5	0.0	100.0	0.0
F	10	132.0	0.0	129.0	0.0	115.0	0.0
	11	123.0	0.0	108.0	0.0	91.0	0.0
	12	123.0	0.0	129.0	0.0	106.0	0.0
G	13	0.0	5.6	0.0	4.9	0.0	4.5
	14	0.0	5.5	0.0	5.3	0.0	5.4
	15	0.0	5.8	0.0	3.6	0.0	3.4
H	16	0.0	7.4	0.0	6.4	0.0	6.0
	17	0.0	7.4	0.0	6.6	0.0	6.3
	18	0.0	6.9	0.0	6.3	0.0	5.8
J	19	0.0	7.9	0.0	5.9	0.0	6.4
	20	0.0	6.1	0.0	5.8	0.0	7.9
	21	0.0	5.7	0.0	6.3	0.0	6.8

Πίνακας 6. Συγκέντρωση μετάλλων στο θρεπτικό διάλυμα



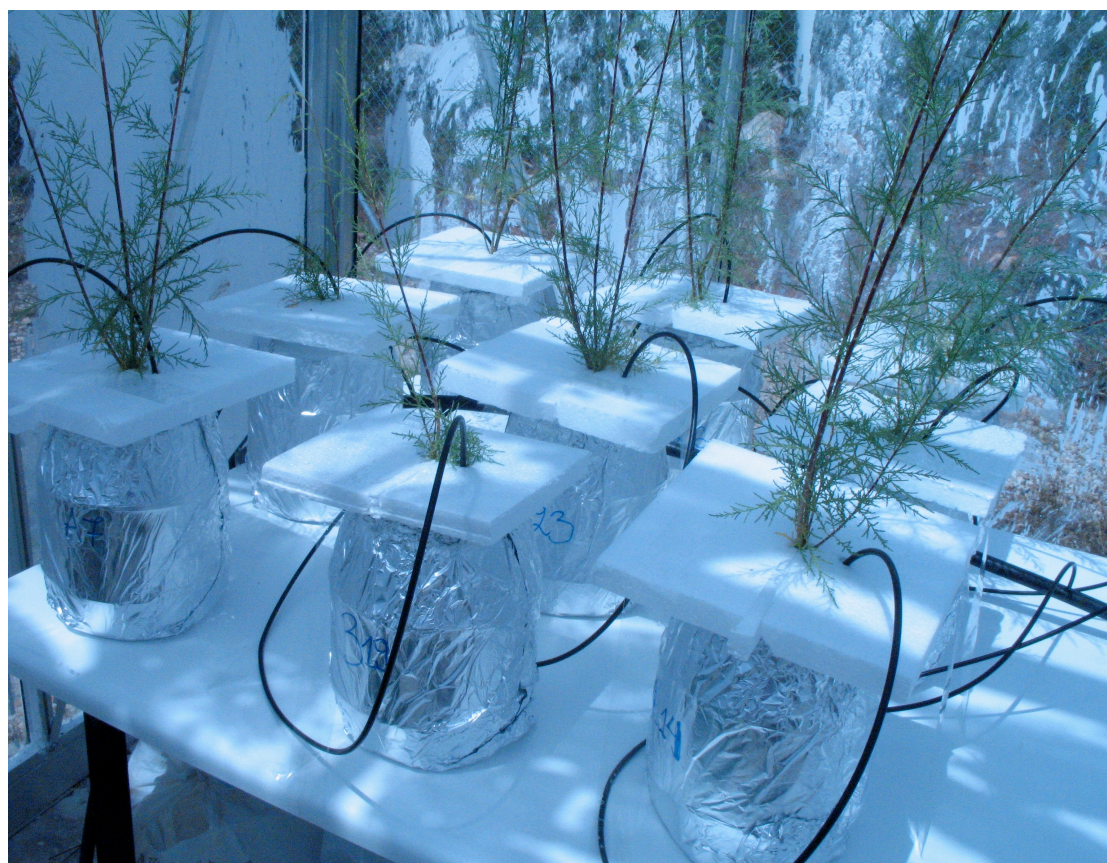
Εικόνα 10.1. Περιοχή συλλογής των εμφυτευμάτων του φυτού *Tamarix Smyrnensis* (Άγιοι Απόστολοι Ν. Χανίων).



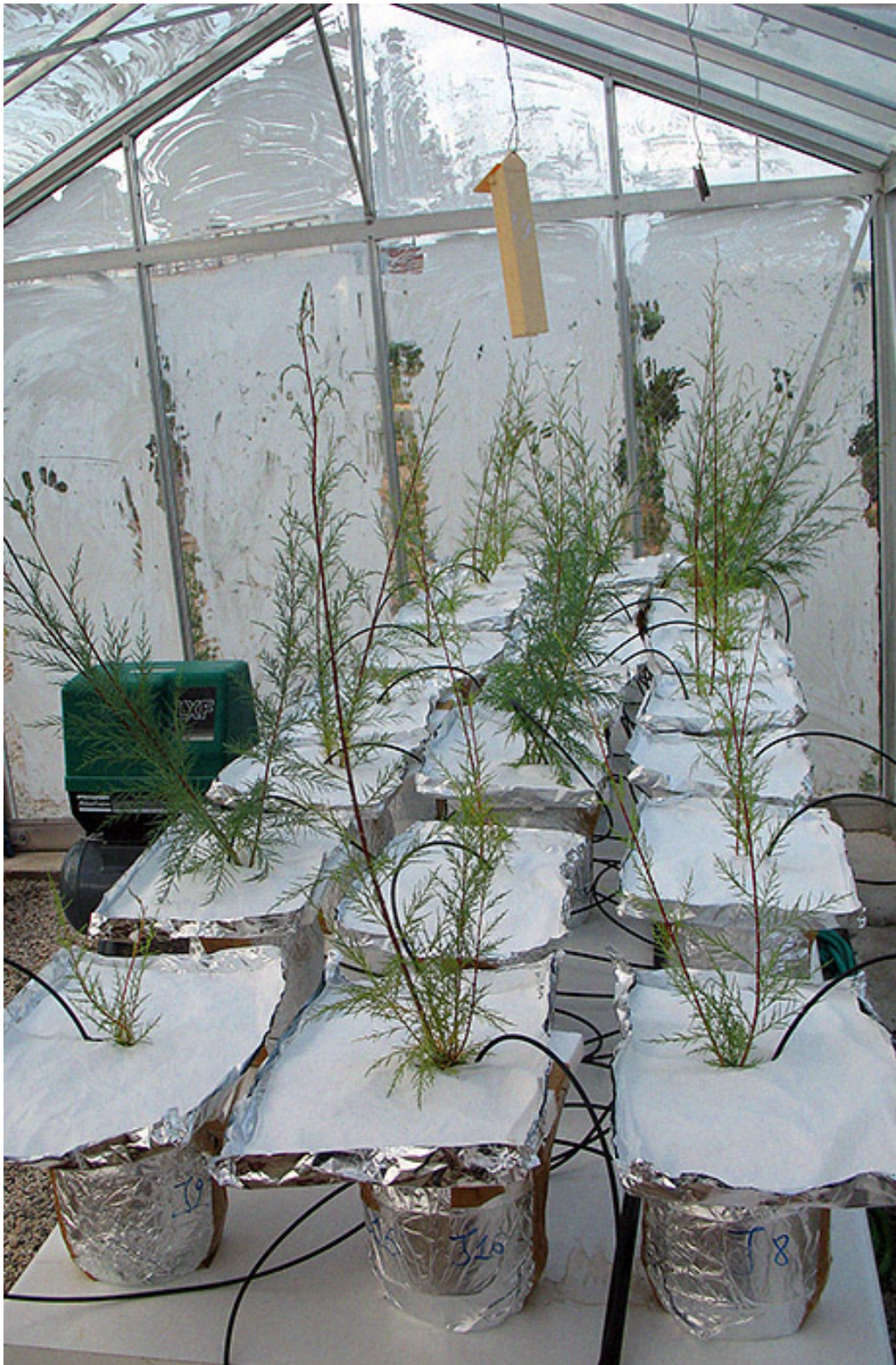
Εικόνα 10.2. Γυάλινο θερμοκήπιο στο οποίο καλλιεργήθηκε το φυτό *Tamarix smyrnensis*.



Εικόνα 10.3 Καλλιέργεια του φυτού *Tamarix Smyrnensis* σε οργανικό υπόστρωμα.



Εικόνα 10.4. Υδροπονική καλλιέργεια του φυτού *Tamarix Smyrnensis*.



Εικόνα 10.5. Υδροπονικό σύστημα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η καλλιέργεια του φυτού *Tamarix Smyrnensis*.